

**SIMULASI PENGARUH TINGGI KERUCUT SATU SISI DAN *BURN-OFF*
LENGTH TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA SAMBUNGAN
CDFW AL6061-ST41**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



BELVA KERTIYASA YUDIANTO

NIM. 135060200111026

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2018

LEMBAR PENGESAHAN

**SIMULASI PENGARUH TINGGI KERUCUT SATU SISI DAN
BURN-OFF LENGTH TERHADAP DISTRIBUSI TEMPERATUR
PADA SAMBUNGAN *CDFW* AL6061-ST41**

SKRIPSI

TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK PRODUKSI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



BELVA KERTIYASA YUDIANTO
NIM. 135060200111026

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 16 Juli 2018

Dosen Pembimbing I

Dr. Eng Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.
NIP. 19750710 199903 1 004

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Mech. Agus Choiron, ST., MT.
NIP. 19720817 200003 1 001

Mengetahui,
Ketua Program Studi S1

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 24 Mei

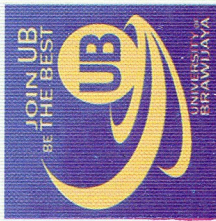
Mahasiswa,



Belva Kertiyasa Yudianto
NIM. 135060200111026



UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM SARJANA



SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI

Nomor : 082/UN10.F07.12.21/PP/2018

Sertifikat ini diberikan kepada :

BELVA KERTIYASA Y

Dengan Judul Skripsi :

**SIMULASI PENGARUH TINGGI KERUCUT DAN BURN-OFF LENGTH TERHADAP
DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA SAMBUNGAN CDFW AIG061-ST41**

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi $\leq 20\%$, dan
dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal **12 JULI 2018**



Ketua Jurusan Teknik Mesin

Ir. Djarot B. Darmadi, MT., Ph.D
NIP. 19670518 199412 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Mesin

Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.
NIP. 19740930 200012 1 001

JUDUL SKRIPSI:

Simulasi Pengaruh Tinggi Kerucut Satu Sisi dan *Burn-off Length* Terhadap Distribusi Temperatur pada Sambungan *CDFW* AL6061-ST41

Nama Mahasiswa : Belva Kertiyasa Yudianto

NIM : 135060200111026

Program Studi : Teknik Mesin

Minat : Teknik Produksi

KOMISI PEMBIMBING

Pembimbing I : Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng.

Pembimbing II : Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT.

TIM DOSEN PENGUJI

Dosen Penguji 1 : Dr. Ir. Achmad As'ad Sonief, MT.

Dosen Penguji 2 : Ir. Tjuk Oerbandono, MSc.CSE.

Dosen Penguji 3 : Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT.

Tanggal SK : 31 Mei 2018

SK Penguji : 1173/UN10.F07/SK/2018

PENGANTAR

Puji Syukur kehadiran Allah SWT, karena hanya dengan rahmat dan hidayah-Nya, penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul **Simulasi Pengaruh Tinggi Kerucut dan Burn-off Length Terhadap Distribusi Temperatur pada Sambungan CDFW Al 6061-St 41**. Skripsi ini ditulis guna melengkapi proses perkuliahan dan sebagai persyaratan akademis untuk mencapai Gelar Sarjana Teknik Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

Dalam kesempatan kali ini penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar – besarnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyusunan laporan skripsi ini diantaranya :

1. Bapak Ir. Djarot B. Darmadi, MT, Ph.D selaku ketua jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
2. Bapak Teguh Dwi Widodo, ST., M.Eng, Ph.D selaku sekretaris jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
3. Bapak Dr. Eng. Mega Nur Sasongko, ST., MT. selaku ketua program studi S1 jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya.
4. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono, Msc. CSE. selaku ketua kelompok konsentrasi teknik produksi.
5. Bapak Dr. Eng. Yudy Surya Irawan, ST., M.Eng. selaku dosen Pembimbing I yang telah memberi bimbingan hingga tuntas, memberikan saran, mencurahkan banyak perhatian dan memberikan dorongan motivasi serta menyemangati selama penyusunan skripsi ini.
6. Bapak Dr. Eng. Moch. Agus Choiron, ST., MT. selaku dosen pembimbing II yang telah memberi bimbingan, saran, motivasi sehingga penulis menyelesaikan skripsi ini.
7. Seluruh dosen jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah mengajarkan banyak ilmu pengetahuan.
8. Orang tua dan seluruh keluarga yang telah mendidik dan membesarkan penulis, memberikan sangat banyak bantuan, arahan, doa, motivasi, dorongan sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi ini.
9. Seluruh asisten Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem di jurusan teknik mesin FT-UB yang telah membantu.

10. Seluruh teman – teman M13 yang memberikan dukungan.

Penulis sadar bahwa penyusunan skripsi ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun diharapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga Skripsi ini Bermanfaat bagi banyak pihak terutama bagi pengembangan ilmu pengetahuan teknik mesin.

Malang, Mei 2018

Penulis



DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN.....	viii
RINGKASAN.....	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Batasan Masalah.....	3
1.4. Tujuan Penelitian.....	3
1.5. Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1. Penelitian Sebelumnya	5
2.2. Pengertian Aluminium.....	6
2.3. Pengertian Baja.....	7
2.4. Pengelasan	9
2.4.1. Definisi Pengelasan	9
2.4.2. <i>Continuous Drive Friction Welding</i>	9
2.4.3. Daerah Sambungan Las	11
2.4.4. <i>Burn-off Length</i>	12
2.4.5. Energi Pada Sambungan Las	13
2.5. Perpindahan Panas.....	15
2.5.1. Konduksi.....	15
2.5.2. Konveksi	15
2.6. Metode Elemen Hingga	15
2.7. <i>Software</i> Berbasis Elemen Hingga	16
2.8. Hipotesis	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	18
3.1. Waktu dan Tempat Penelitian	18
3.2. Variabel Penelitian	18
3.2.1. Varabel Bebas.....	18
3.2.2. Variabel terikat	19
3.2.3. Variabel Kontrol.....	19

3.3. Prosedur Penelitian.....	20
3.5.1. Studi Literatur	20
3.5.2. Permodelan Material	20
3.5.3. <i>Solution</i>	29
3.4. Diagram Alir Penelitian	30
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	31
4.1. Data dan Analisa Pengaruh Tinggi Kerucut dan <i>Burn-off Length</i> Terhadap Temperatur maksimum Benda Kerja	31
4.1.1. Analisa Pengaruh Tinggi Kerucut dan <i>Burn-off Length</i> terhadap temperatur maksimum	32
4.2. Data dan Analisa Pengaruh Tinggi Kerucut dan <i>Burn-off Length</i> Terhadap Distribusi Tempertur pada Benda Kerja	33
4.2.1. Analisa Pengaruh Tinggi Kerucut dan <i>Burn-off Length</i> Terhadap Distribusi Suhu pada Benda Kerja.....	40
BAB V PENUTUP	45
5.1. Kesimpulan	45
5.2. Saran.....	45
DAFTAR PUSTAKA	
LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1.	Komposisi kimia berdasarkan berat A6061	6
Tabel 2.2.	Klasifikasi paduan Alumunium.....	6
Tabel 2.3.	Persentase komposisi kimia berdasarkan berat St 41 (%).....	19
Tabel 3.1.	<i>friction time</i> pada masing masing variasi	18
Tabel 3.2.	Total Deformasi Pada masing masing variasi	19
Tabel 3.3.	Material Properties dari Aluminium AL-6061 terhadap perubahan temperatur.....	21
Tabel 3.4.	Tegangan-Regangan berbagai temperature material Al 6061	22
Tabel 3.5.	Tegangan-regangan material St 41	23
Tabel 4.1.	Data Temperatur Maksimum Benda Kerja pada metode simulasi.....	31
Tabel 4.2.	Data Distribusi Temperatur pada permukaan benda kerja (A6061) pada Tinggi Kerucut 0 mm dan Tinggi Kerucut 1mm.....	34
Tabel 4.3.	Data Distribusi Temperatur pada permukaan benda kerja (A6061) pada Tinggi Kerucut 2 mm dan Tinggi Kerucut 3mm.....	37

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1.	Skema tahap-tahap dari proses <i>friction welding</i>	10
Gambar 2.2.	Parameter <i>friction welding</i>	10
Gambar 2.3.	Aplikasi Friction welding	11
Gambar 2.4.	Daerah HAZ Pada Continuous Drive Friction Welding	12
Gambar 2.5.	Pengaruh <i>Friction Pressure</i> dan <i>Rotational Speed</i> Pada HAZ	12
Gambar 2.6.	<i>Burn-off length</i>	13
Gambar 2.7.	<i>Friction Surface</i>	14
Gambar 3.1.	CDFW	19
Gambar 3.2.	Skema Pemberian gaya tekan awaldan akhir	20
Gambar 3.3.	Analaisa <i>Transient Thermal-Static Structural</i>	20
Gambar 3.4.	Grafik tegangan regangan Material Al 6061	21
Gambar 3.5.	<i>Engineering Data</i> Al 6061	22
Gambar 3.6.	Permodelan kurva tegangan-regangan berbagai temperatur material Al6061 pada software FEM	22
Gambar 3.7.	Grafik tegangan regangan Material St 41 terhadap temperatur.....	23
Gambar 3.8.	Engineering data material St 41	23
Gambar 3.9.	Permodelan Kurva tegangan-reganganberbagai temperatur material ST-41 pada Software FEM	24
Gambar 3.10.	Dimensi spesimen al 6061.....	24
Gambar 3.11.	Dimensi spesimen St 41	24
Gambar 3.12.	Model benda kerja pada ANSYS	25
Gambar 3.13.	Meshing benda kerja.....	25
Gambar 3.14.	Contoh <i>load heat flux</i>	26
Gambar 3.15.	Grafik heat input pada masing masing variasi tinggi kerucut	27
Gambar 3.16.	<i>Setup transient thermal</i>	27
Gambar 3.17.	<i>Cylindrical support load</i>	28
Gambar 3.18.	<i>Rotational velocity load</i>	28
Gambar 3.19.	<i>Displacement load</i>	29
Gambar 3.20.	<i>Setup Static structural</i>	29
Gambar 4.1.	Grafik Pengaruh Tinggi Kerucut satu sisi dan burn-off-length terhadap temperatur maksimum metode Simulasi CDFW A6061-ST41	31
Gambar 4.2.	Grafik Pengaruh Tinggi Kerucut satu sisi dan burn-off-length terhadap temperatur maksimum metode true experimental CDFW A6061-ST41 dengan menggunakan alat ukur infra red thermogun	32
Gambar 4.3.	Grafik Pengaruh Tinggi Kerucut satu sisi dan burn-off-length terhadap temperatur maksimum metode Simulasi CDFW A6061-ST41	33
Gambar 4.4.	Distribusi Temperatur (°C) pada permukaan Al-6061 Tinggi Kerucut 0 mm	35

Gambar 4.5. Distribusi Temperatur (°C) pada permukaan Al-6061 Tinggi Kerucut 1 mm.....	36
Gambar 4.6. Distribusi Temperatur (°C) pada permukaan Al-6061 Tinggi Kerucut 2 mm	38
Gambar 4.7. Distribusi Temperatur (°C) pada permukaan Al-6061 Tinggi Kerucut 3 mm.....	39
Gambar 4.8. Grafik Pengaruh Tinggi Kerucut dan Burn-off Length terhadap distribusi temperatur permukaan A6061 pada simulasi CDFW sambungan A6061-ST41	40
Gambar 4.9. Grafik distribusi temperatur tertinggi pada Tinggi Kerucut 0mm dengan berbagai fariasi burn-off-length terhadap distribusi temperature pada permukaan A6061 pada simulasi CDFW sambungan A6061-ST41	41
Gambar 4.10. Perbedaan hasil CDFW pada distribusi temperatur tertinggi dengan variasi tinggi kerucut 0mm	42
Gambar 4.11. Grafik distribusi temperatur terendah pada Tinggi Kerucut 3mm dengan berbagai fariasi Burn-off Length terhadap distribusi temperature pada permukaan A6061 pada simulasi CDFW sambungan A6061-ST41	43
Gambar 4.12. Perbedaan hasil CDFW A6061-ST41 pada temperatur terendah dengan tinggi kerucut 3mm	44

DAFTAR LAMPIRAN

- Lampiran 1 : Langkah-langkah pemodelan simulasi (variasi tinggik kerucut 3mm dan *burn-off length* 7mm)
- Lampiran 2 : Hasil Simulasi (Distribusi Suhu)
- Lampiran 3 : Hasil Simulasi (Total Deformasi)
- Lampiran 4 : Perhitungan *Heat Input* pada masing-masing tinggi kerucut



RINGKASAN

Belva Kertiyasa Yudianto, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Mei 2017, Simulasi Pengaruh Tinggi Kerucut dan *Burn-off Length* Terhadap Distribusi Temperatur Pada Sambungan CDFW Al6061-ST41. Dosen Pembimbing: Yudy Surya Irawan dan Moch. Agus Choiron.

Metode pengelasan merupakan salah satu cara dalam menyambung logam. Las gesek CDFW (continuous drive friction welding) adalah metode pengelasan yang banyak digunakan dalam industri manufaktur. Las CDFW menggabungkan dua buah logam menjadi satu dengan cara memutar salah satu logam dan memberi tekanan pada sisi logam lainnya, sehingga terjadi gesekan pada kedua ujung logam yang menghasilkan panas pada logam. Panas tersebut kemudian dapat merubah fase kedua ujung logam yang bersentuhan sehingga dapat terjadi proses penyambungan.

Keuntungan dari metode pengelasan CDFW adalah waktu pengelasan yang relatif cepat dan mampu digunakan pada logam dengan weldability rendah, seperti aluminium. Penelitian ini bertujuan untuk mensimulasikan dissimilar CDFW mengenai pengaruh burn-off length dan tinggi kerucut terhadap distribusi temperatur benda kerja pada pengelasan CDFW. Material yang digunakan pada benda kerja yakni Al-6061 dan St 41.

Penelitian ini menggunakan software berbasis elemen hingga. Salah satu benda kerja di putar dengan kecepatan 1600 RPM. Benda kerja yang lain diberi tekanan awal sebesar 7000 N, dengan friction time selama waktu yang diperlukan untuk mencapai burn-off length masing masing benda kerja yang kemudian diberi upset force sebesar 17500 N selama 10 detik.

Hasil penelitian menunjukkan semakin besar tinggi kerucut maka temperatur maksimum benda kerja akan semakin rendah. Dan semakin panjang burn-off length friction time yang dibutuhkan akan semakin lama sehingga menyebabkan benda kerja menerima heat input yang lebih besar. Temperatur tertinggi dihasilkan oleh variasi tinggi kerucut 0 mm dan burn-off length sebesar 7 mm yaitu 595,39 °C. Temperatur terendah dihasilkan oleh variasi tinggi kerucut 3 mm dan burn-off length sebesar 3 mm yaitu 370.640 °C. Semakin besar burn-off length dan semakin kecil tinggi kerucut akan menghasilkan temperatur yang tinggi dan memperluas daerah HAZ (Heat Affected Zone).

Kata Kunci: *Continuous Drive friction Welding*, simulasi pengelasan, *burn-off length*, tinggi kerucut, temperatur.

SUMMARY

Belva Kertiyasa Yudianto, *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, Mei 2018, Simulation of The effect of cone height and burn-off length againts Temperature Distribution on CDFW Joint Al6061-ST41. Academic Supevisor: Yudy Surya Irawan and Moch. Agus Choiron.*

Welding is one of the metal joining process in manufacturing. Joining metal with welding method have many way, for example is using continous drive friction welding. Friction welding is one of other method to joining aluminum. Friction welding joins two metal rods by giving torsional speed to one rod and pressure to another rod, creating heat through friction and joins the two materials. This research is trying to determine the effect of various cone height and burn-off length to the heat distribution on material Al-6061 with St-41 using CDFW method that is been simulated with Finite Element Analysis (FEA). The torsional speed is 1600 rpm on one side, initial pressure is 7000 N on another side, friction time are based on each variations, and the upset force at last for 10 second. From the research, we can conclude that a larger cone height and smaller burn-off length creates a lower temperature, with the highest temperature generated with the cone height at 0 mm and burn-off length at 7 mm at 595,39 °C. The lowest temperature generated with the cone height at 3 mm and burn-off length at 3 which is 370.640 °C. A larger burn-off length and smallest cone make highest temperature and widest heat affected zone (HAZ)

Keywords: Continuous Drive Friction Welding, Welding Simulation, Cone Height, Burn-off length, Temperature.

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di era modern ini industri semakin maju dan berkembang maka dari itu kita perlu meningkatkan teknologi dan ilmu pengetahuan guna memenuhi tuntutan kebutuhan produksi dan persaingan global yang semakin meningkat. Alumunium dan baja merupakan material yang sering kita jumpai pada proses manufaktur.

Alumunium adalah logam yang sangat berlimpah keberadaannya di muka bumi ini, konduktor panas yang baik, memiliki ketahanan korosi, ringan, kuat, serta merupakan konduktor listrik yang baik. Alumunium dapat dimanfaatkan dalam berbagai hal. Berikut ialah contoh industry yang menggunakan aluminium adalah industri pesawat, industri otomotif, industri peralatan rumah tangga, industri perkapalan, industri kelistrikan, industri konstruksi, dan lain-lain.

Baja adalah logam paduan, logam besi sebagai unsur dasar dengan beberapa elemen lainnya, termasuk karbon. Kandungan unsur karbon dalam baja berkisar antara 0.2% hingga 2.1% berat sesuai grade-nya. Elemen berikut ini selalu ada dalam baja: karbon, mangan, fosfor, sulfur, silikon, dan sebagian kecil oksigen, nitrogen dan aluminium. Selain itu, ada elemen lain yang ditambahkan untuk membedakan karakteristik antara beberapa jenis baja diantaranya: mangan, nikel, krom, molybdenum, boron, titanium, vanadium dan niobium. Dengan memvariasikan kandungan karbon dan unsur paduan lainnya, berbagai jenis kualitas baja bisa didapatkan. Fungsi karbon dalam baja adalah sebagai unsur penguat dengan mencegah dislokasi bergeser pada kisi kristal (crystal lattice) atom besi. Baja karbon ini dikenal sebagai baja hitam karena berwarna hitam, banyak digunakan untuk peralatan pertanian misalnya sabit dan cangkul.

Pengelasan antara aluminium dan baja dapat menghasilkan perpaduan karakteristik material yang bagus. Penggabungan alumunium dan baja menjadikan material yang ringan, tahan korosi, tahan aus, dan juga kuat. Sifat-sifat tersebut berguna pada berbagai industri saat ini

Penggabungan alumunium dan baja tentu tidak mudah dilakukan menggunakan *friction welding*. Hal tersebut disebabkan karena titik lebur atau titik leleh kedua material ini memiliki perbedaan yang signifikan. Dalam industri, penggabungan material adalah salah satu faktor penting dalam proses produksi. Pengelasan adalah salah satu cara untuk menggabungkan material logam. Pengelasan sendiri ada berbagai cara yang salah satunya

adalah las gesek atau *friction welding*. Las gesek merupakan salah satu metode penggabungan dua material dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan dari gesekan antara permukaan dua material itu sendiri yang kemudian disambungkan (Prasetyono, 2012).

Ketika proses pengelasan gesek benda mengalami 4 perubahan fase yang berbeda-beda yaitu *solid phase*, *transition phase*, *steady phase* dan *phase* pendinginan. Gesekan terjadi pada *solid phase*, panas akan timbul akibat gesekan kedua material dan mengalami peningkatan panas sejalan dengan adanya kecepatan putar dan tekanan yang diberikan. Kemampuan dari material dalam penyerapan panas menyebabkan terjadinya perbedaan pada ukuran butir di daerah sambungan antara kedua sisi material. Luas permukaan bidang kontak berpengaruh terhadap seberapa besar panas yang akan dihasilkan dalam proses penyambungan dalam waktu dan tekanan yang sama. Gaya yang diterima pada benda kerja akan menghasilkan tekanan yang lebih besar pada permukaan sisi kontak dengan luasan kontak kecil, sehingga waktu yang dibutuhkan untuk memanaskan daerah sambungan bisa cepat tercapai (Spindler, 1994).

Beberapa keuntungan dari *friction welding* ini adalah penghematan material, memerlukan waktu yang cepat untuk penyambungan dua material yang sama maupun yang berbeda. *Friction welding* bisa untuk menyambungkan material yang bulat maupun tidak. Parameter pada proses yang penting adalah waktu gesekan, tekanan gesekan, waktu tempa, tekanan tempa dan kecepatan putar (Kalpakjian, 2001).

Berbagai keuntungan pengelasan gesek dibandingkan dengan proses pengelasan lainnya adalah tidak diperlukannya pengisi elektroda maupun gas pada proses pengelasannya, tidak menghasilkan gas serta sampah, tidak memerlukan fluks, tidak ada percikan api las dan asap yang dihasilkan, bisa menyambung dua logam yang berbeda (*dissimilar*), sehingga dapat mengurangi mengurangi biaya bahan baku dalam aplikasi pengelasan logam yang berbeda, dapat menyambung material berbentuk bulat ataupun tidak bulat serta kekuatan yang akan dihasilkan pada sambungan las yang hampir sama dengan kekuatan logam induknya.

Penelitian ini menggunakan variasi *Burn-off Length* pada benda kerja dan tinggi kerucut pada salah satu benda kerja, dimana variabel tersebut memberikan pengaruh terhadap distribusi temperatur dari benda kerja pada saat pengelasan *continuous drive friction welding* dengan menggunakan material Aluminium A6061 dan baja St41. Penelitian ini dilakukan karena belum ada penelitian mengenai distribusi suhu pada *continuous drive friction welding* dengan variasi dan material yang telah disebutkan.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah untuk penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh tinggi kerucut satu sisi pada baja St41 dan *burn-off length* terhadap suhu maksimum pada benda kerja A6061 – St41?
2. Bagaimana pengaruh tinggi kerucut satu sisi pada baja St41 dan *burn-off length* terhadap distribusi suhu pada benda kerja A6061 – St41?

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah untuk penelitian ini adalah:

1. Simulasi menggunakan *software Mechanical Finite Element Analysis* (Analisa Elemen Hingga)
2. Penelitian yang akan dibahas adalah temperatur maksimum dan distribusi temperatur pada benda kerja pada permukaan sambungan las.
3. Radiasi pada penelitian ini diasumsikan tidak ada.
4. Kedua spesimen yang digunakan menggunakan material yang berbeda (*disimilar friction welding*).
5. Temperatur lingkungan diasumsikan konstan yakni 26°C.
6. *Friction time*, *friction pressure*, *upset force*, dan *rotational speed* pada setiap variasi memiliki nilai yang sama.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang akan dicapai dalam penelitian ini yaitu:

1. Untuk mengetahui pengaruh tinggi kerucut satu sisi pada baja St41 dan *burn-off length* terhadap suhu maksimum pada benda kerja A6061-St41.
2. Untuk mengetahui pengaruh tinggi kerucut satu sisi pada baja St41 dan *burn-off Length* terhadap distribusi suhu pada benda kerja A6061-St41.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memiliki manfaat sebagai berikut:

1. Sebagai dasar acuan sehingga dapat dilakukan penelitian lebih lanjut tentang teknologi las gesek atau *friction welding*
2. Sebagai acuan dalam dunia industri atau aplikasi sebenarnya untuk pengembangan pada proses las gesek yang lebih optimal dan lebih efisien.

3. Mengurangi biaya yang harus dikeluarkan akibat dari *trial and error* pada metode eksperimental murni dengan cara memberi informasi tentang menganalisa hasil proses pengelasan *continuous drive friction welding* menggunakan *software Finite Element Analysis* (Analisa Elemen Hingga).
4. Memberikan kontribusi dalam bidang pengelasan gesek, khususnya tipe CDFW (*Continuous Drive Friction Welding*) dengan material aluminium dan baja



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Dheni (2017) dalam penelitian friction welding dengan judul “Pengaruh Dimensi Kerucut Satu Sisi dan *Burn-Off Length* Terhadap Distribusi Kekerasan dan Struktur Mikro Sambungan Friction welding A6061-ST41” Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh tinggi kerucut satu sisi dan Burn-off Length pada sambungan St41-AI6061. Tinggi kerucut sebesar 0 mm, 1 mm, 2 mm, dan 3 mm. Burn-off length sebesar 3 mm, 5 mm, dan 7 mm, dengan upset time selama 10 s. Salah satu benda kerja diputar dengan rotational speed sebesar 1600 rpm. Tekanan hidrolik yang diberikan pada saat friction adalah 7000 N dan tekanan pada saat upset adalah 17500 N. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar dimensi kerucut dan semakin rendah burn-off length yaitu pada specimen dengan tinggi kerucut 3 mm dan burn-off length 3 mm kekerasannya tertinggi dengan nilai rata-rata kekerasan 88.01 VHN pada A6061 dan 342.65 VHN pada St41. Semakin rendah tinggi kerucut dan semakin besar burn-off length yaitu pada specimen dengan tinggi kerucut 0 mm dan burn-off length 7 mm dihasilkan rata-rata kekerasan dengan nilai terendah pada A6061 sebesar 51.29 VHN dan 164.5 VHN pada St41. Dari penelitian yang dilakukan diketahui bahwa semakin tinggi kerucut dan semakin rendah burn-off length menyebabkan heat input yang

Hazman (2010) dalam penelitiannya friction welding antara baja karbon rendah dan aluminum. Pada penelitian disebutkan ikatan antara aluminium dan baja dapat terbentuk. Material di daerah las akan memiliki tingkat kekerasan yang lebih rendah dari pada logam induknya dikarenakan *thermal effect* dari friction welding. Selain itu, *tensile strength* juga lebih rendah dari logam induknya.

Imadudin (2017) dalam penelitiannya yang berjudul “Simulasi Pengaruh *Burn-Off Length* dan Tinggi Kerucut Terhadap Distribusi Suhu Pengelasan CDFW A6061” Penelitian ini bertujuan untuk membuat simulasi mengenai pengaruh *burn-off length* 3 mm, 5 mm, 7 mm dan tinggi kerucut 1 mm, 2 mm, dan 3 mm terhadap distribusi suhu benda kerja pada pengelasan CDFW. Material yang digunakan adalah A6061. Penelitian ini menggunakan *software* berbasis elemen hingga. Putaran mesin sebesar 1600 RPM. Tekanan awal sebesar 4 MPa, dengan *friction time* selama 10 detik. Putaran benda kerja dilakukan selama 5 detik. Setelah itu putaran mesin dihentikan dan dilakukan *upset force* sebesar 17,5 kN. Hasil penelitian menunjukkan semakin besar tinggi kerucut maka luas permukaan ketika

dilakukan *upset force* akan semakin besar. Luas permukaan berpengaruh pada tekanan sehingga *heat input* yang dihasilkan semakin besar. Suhu tertinggi dihasilkan oleh variasi tinggi kerucut 3 mm dan *burn-off length* sebesar 7 mm yaitu 146,99°C. Semakin besar *burn-off length* akan menghasilkan daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) yang semakin luas. Daerah HAZ yang semakin luas akan memberikan kekuatan sambungan yang lebih baik. Berdasarkan deskripsi tersebut, maka variasi tinggi kerucut 3 mm dan *burn-off length* 7 mm adalah yang paling optimal.

2.2 Pengertian Aluminium

Aluminium adalah suatu logam yang ringan dan mempunyai kekuatan tinggi, tahan terhadap korosi, serta merupakan konduktor listrik yang baik. Aluminium adalah jenis logam yang paling banyak digunakan setelah baja (Harsono, 2000:113). Karakteristik utama aluminium adalah ringan (berat jenis = 2,7 gr/cm³) dibandingkan dengan baja (berat jenis = 7,8 gr/cm³), serta memiliki keuletan yang cukup tinggi. Maka dengan sifat-sifatnya yang seperti itu Aluminium banyak digunakan secara luas di industri. Dibawah ini adalah tabel dari komposisi aluminium.

Tabel 2.1
Komposisi kimia berdasarkan berat A6061

No	Si (%)	Fe(%)	Cu(%)	Mn (%)	Mg (%)	Cr (%)	Zn(%)	Ti (%)
6061	0,4-0,8	0,7	0,15-0,4	0,15	0,8-1,2	0,04-0,35	0,25	0,15

Sumber: Kissel (2002, p. 330)

Secara umum paduan aluminium dapat diklasifikasikan menjadi tiga yakni berdasarkan pembuatannya, berdasarkan perlakuannya, dan berdasarkan unsur-unsur paduannya. Berdasarkan paduannya aluminium dibagi menjadi 7 jenis, dimana dapat dilihat dalam tabel klasifikasi tentang tiap jenisnya

Tabel 2.2
Klasifikasi paduan Aluminium

No Seri	Elemen Utama Paduan	Ketahanan Korosi	Kekuatan	Perlakuan Panas
1xxx	Tidak ada	Baik Sekali	Sedang	Tidak Mampu
2xxx	Tembaga	Sedang	Baik Sekali	Mampu

3xxx	Mangan	Baik		Tidak Mampu
4xxx	Silikon	-	-	Tergantung Paduan
5xxx	Magnesium	Baik	Baik	Tidak Mampu
6xxx	Magnesium dan Silikon	Baik	Baik	Mampu
7xxx	Seng	Sedang	Baik Sekali	Mampu

Sumber: Kissel (2002, p.14)

Sistem empat digit yang digunakan untuk mengidentifikasi aluminium dan paduan aluminium. Penetapan standarisasi logam aluminium menurut ASM mempergunakan angka dalam menetapkan aluminium paduan.

Cara pembacaan penggolongan aluminium berdasarkan tabel 2.2 :

xxxx : Angka pertama merupakan jenis unsur paduan utama yang terdapat pada aluminium.

Angka 1 merupakan kandungan unsur aluminium murni antara 99 – 99,9 %. Angka 2 memiliki tembaga sebagai unsur paduan utamanya. Angka 3 memiliki mangan sebagai unsur paduan utamanya. Angka 4 memiliki silikon sebagai unsur paduan utamanya. Angka 5 memiliki magnesium sebagai unsur paduan utamanya. Angka 6 memiliki magnesium-silikon sebagai unsur paduan utamanya. Angka 7 memiliki Zinc sebagai unsur paduan utamanya.

xxxx : Angka kedua menunjukkan paduan aluminium tersebut merupakan hasil olahan keberapa. Misalkan angka 0 merupakan hasil asli (belum diolah), angka 1 menunjukkan hasil olahan pertama dan seterusnya.

xxxx : Dua terakhir dari empat digit di 2xxx sampai kelompok 8xxx tidak memiliki arti khusus, tapi hanya berfungsi untuk mengidentifikasi perbedaan paduan aluminium dalam kelompok (ASM Handbook Vol.2, 1990)

Paduan Al – Mg – Si termasuk dalam jenis yang dapat diperlakukan-panaskan dan mempunyai sifat mampu potong yang baik, mampu las, dan daya tahan korosi yang baik.

Pada pengelasan gesek, material tidak perlu mencair untuk dilakukan penyambungan. Material tersebut hanya perlu mencapai suhu rekristalisasi sehingga bisa menyatu.

2.3 Pengertian Baja

Baja adalah paduan yang sebagian besar unsurnya terdiri dari unsur besi dan karbon 0,2%-2,1%. Selain itu juga mengandung unsur-unsur lainnya seperti sulfur (S), fosfor (P), Mangan (Mn), Silikon (Si) dan sebagainya. Sifat baja karbon dipengaruhi oleh jumlah prosentase karbon dan struktur mikro. Struktur mikro pada baja karbon dipengaruhi oleh

perlakuan panas serta komposisi baja. Karbon dengan campuran unsur lain dapat meningkatkan nilai kekerasan, tahan suhu dan tahan gores. Karbon adalah unsur paduan utama baja, maka baja dapat digolongkan menjadi tiga yaitu baja karbon rendah, baja karbon sedang, dan juga baja karbon tinggi (Amanto dkk, 1999).

Berdasarkan pada kandungan karbonnya, baja dibagi menjadi:

1. Baja karbon tinggi

Baja dengan karbon tinggi mengandung karbon 0,6 % C - 1,5 % C serta memiliki kekerasan yang lebih tinggi, namun keuletannya lebih rendah. Berbeda dengan baja karbon rendah, pengerasan dengan perlakuan panas pada baja karbon tinggi tidak memberikan hasil yang optimal karena terlalu banyaknya martensit, sehingga membuat baja menjadi getas.

2. Baja karbon sedang

Baja dengan karbon sedang (*medium carbon steel*) memiliki karbon 0,3 % C - 0,6 % C. Dengan kandungan karbonnya maka memungkinkan baja untuk dikeraskan melalui proses perlakuan panas yang sesuai. Baja karbon sedang lebih keras serta lebih kuat dibandingkan dengan baja karbon rendah.

3. Baja karbon rendah

Baja karbon rendah (*low carbon steel*) memiliki karbon dalam campuran baja kurang dari 0,3 % C. Baja karbon rendah ini tidak dapat dikeraskan karena kandungan karbonnya tidak cukup untuk membentuk struktur martensit. (Amanto dkk, 1999)

Sedangkan untuk baja paduan terdiri dari:

1. Baja Paduan Tinggi (*High Alloy Steel*) Baja paduan tinggi adalah baja paduan yang elemen paduannya lebih dari 10% wt, misalnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain-lain.
2. Baja Paduan Menengah (*Medium Alloy Steel*) Baja paduan menengah adalah baja paduan yang elemen paduannya 2,5% - 10% wt, misalnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain-lain.
3. Baja Paduan Rendah (*Low Alloy Steel*) Baja paduan rendah adalah baja paduan yang elemen paduannya kurang dari 2,5% wt, misalnya unsur Cr, Mn, Ni, S, Si, P dan lain-lain. (Amanto, 1999)

Baja St 41 adalah jenis logam baja karbon rendah, logam ini terdiri dari campuran pearlite dan ferrite. Kekuatan dan keuletan pada St41 memiliki daya tahan yang baik. Baja ini banyak digunakan pada poros-poros, cetakan tempa, pegas, palu dan perkakas lainnya (Santoso dkk, 2008). Baja St 41 merupakan baja yang memiliki gaya tarik maksimal mencapai 40 kg/mm², baja St 41 masuk dalam baja karbon rendah artinya memiliki

kandungan karbon antara 0,025% - 0,25% C. Pada 1 ton baja karbon rendah memiliki 10–30 kg karbon. Baja St 41 memiliki nilai kekerasan lebih rendah dibandingkan dengan besi cor, karena adanya perlit dan ferit dan perlit yang dikandung lebih banyak dari pada ferit. Komposisi unsur yang dimiliki baja akan memberikan reaksi yang berbeda-beda pada saat baja mengalami proses perlakuan panas (*heat treatment*).

Tabel 2.3

Persentase komposisi kimia berdasarkan berat St 41 (%)

	C	Si	Mn	P	S
St41	0,2 max	0.2	0.6	0.05	0.05

Sumber: Ross (1992)

2.4 Pengelasan

2.4.1 Definisi Pengelasan

Menurut *American Welding Society* (AWS), proses pengelasan adalah proses penyambungan antara metal atau non-metal yang menghasilkan satu bagian yang menyatu, dengan memanaskan material yang akan disambung sampai pada suhu pengelasan tertentu, dengan atau tanpa penekanan, dan dengan atau tanpa logam pengisi. Berdasarkan cara kerjanya, proses pengelasan dibagi menjadi tiga yaitu:

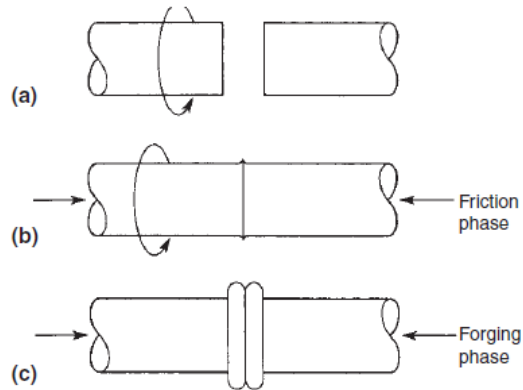
- Pengelasan cair, yakni metode pengelasan dengan memanaskan sambungan hingga mencair menggunakan sumber panas dari *arc* (busur listrik) atau semburan api gas.
- Pengelasan tekan, yakni metode pengelasan dengan menyatukan sambungan dengan cara dipanaskan kemudian ditekan.
- Pematrian, yakni metode pengelasan dengan menyambung logam dengan paduan logam yang mempunyai titik lebur lebih rendah daripada logam induk, sehingga logam induk tidak ikut mencair.

2.4.2 Continuous Drive Friction Welding

Friction welding merupakan pengelasan yang memanfaatkan panas yang dihasilkan dari gesekan dari benda kerja dimana salah satu benda kerja berotasi dan yang lain dalam kondisi diam dan menekan.

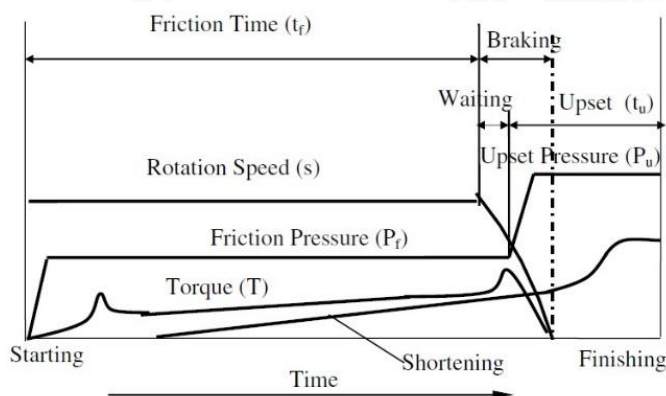
Mekanisme proses ini adalah ketika salah satu benda berotasi dengan kecepatan tinggi dan benda kerja yang lain memberi tekanan benda yang berotasi tersebut. Akibat dari proses tersebut menyebabkan panas pada benda kerja sehingga partikel dari kedua logam terkristalisasi dan dapat saling berikatan. Putaran pada benda kerja mengakibatkan partikel

dari kedua benda teraduk. Gaya tekan menyebabkan partikel benda terdorong untuk mengisi celah kosong dan mentransfer udara di daerah lasan dari system ke lingkungan. Dari proses ini dihasilkan proses penyambungan logam tanpa pencairan atau yang dinamakan *solid state process*



Gambar 2.1 Skema tahap-tahap dari proses *friction welding*
Sumber: Elmer (1993)

Pada pegelasan *friction welding* ini terdapat parameter-parameter yang harus diperhatikan ketika proses penyambungan. Dibawah ini adalah parameter-parameter dalam *friction welding*.



Gambar 2.2 Parameter *friction welding*
Sumber: Sahin (2008)

Setiap teknologi dan metode pengelasan memiliki kelebihan dan kekurangan yang berbeda-beda sesuai kebutuhan, begitu juga dengan proses pengelasan *continuous drive friction welding*. Berikut ini adalah kelebihan dari *continuous drive friction welding*.

- Alat yang digunakan dalam proses pengelasan relatif sederhana.
- Tidak memerlukan logam atau material pengisi dan pelindung.

- Bisa digunakan untuk mengelas logam yang tidak sejenis / *dissimilar*.
- Biaya operasional relatif lebih murah.
- Laju produksi lebih cepat daripada pengelasan konvensional.

Pengelasan dengan menggunakan metode ini sudah banyak digunakan di berbagai macam industri. Salah satu contoh penyambungan dengan menggunakan metode ini ditunjukkan pada gambar 2.3 berikut:

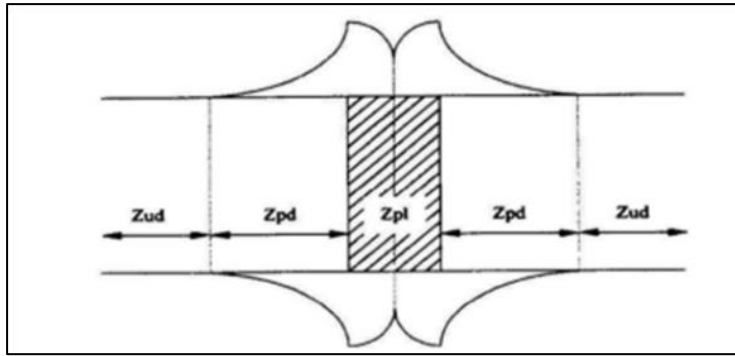


Gambar 2.3 Aplikasi Friction welding
Sumber : AmTech International

2.4.3 Daerah Sambungan Las

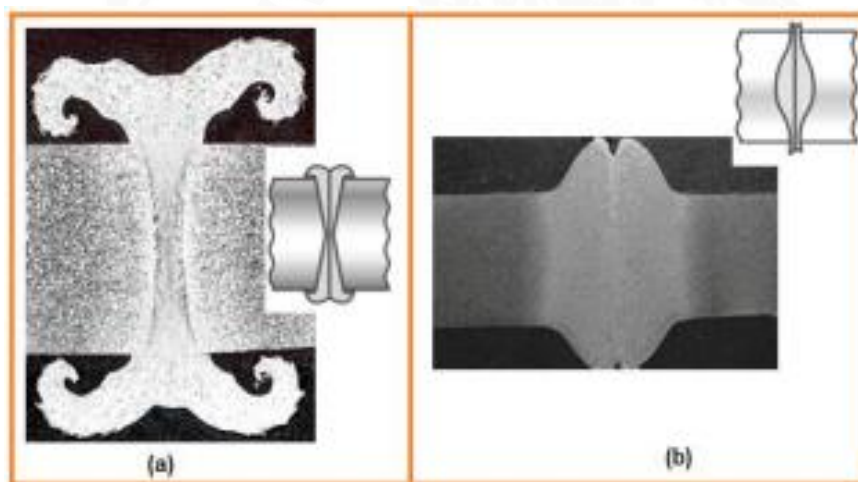
Heat affected zone (HAZ) adalah daerah yang dipengaruhi panas saat proses pengelasan, yang mengakibatkan perubahan sifat- sifat mekanis dan struktur mikro dari benda kerja. Luas daerah HAZ dipengaruhi oleh panas yang dihasilkan dari kedua benda kerja yang bergesekan pada proses pengelasan tersebut. temperatur yang semakin tinggi menyebabkan daerah HAZ semakin luas. Daerah HAZ pada proses pengelasan *continuous drive friction welding* dibagi menjadi tiga bagian, diantaranya adalah:

1. *Fully plasticized zone* (Zpl), adalah daerah HAZ yang terdeformasi plastis menyeluruh dan merupakan bagian yang menyatu saat pengelasan.
2. *Partly deformed zone* (Zpd), adalah daerah HAZ terdeformasi sebagian akibat panas dan tekanan saat proses pengelasan.
3. *Undeformed zone* (Zud) adalah daerah yang tidak terpengaruh panas, atau terkena panas tetapi tidak terdeformasi.



Gambar 2.4 Daerah HAZ (*Heat Affected Zone*) Pada *Continuous Drive Friction Welding*
Sumber: Lin et al (1999,p.102)

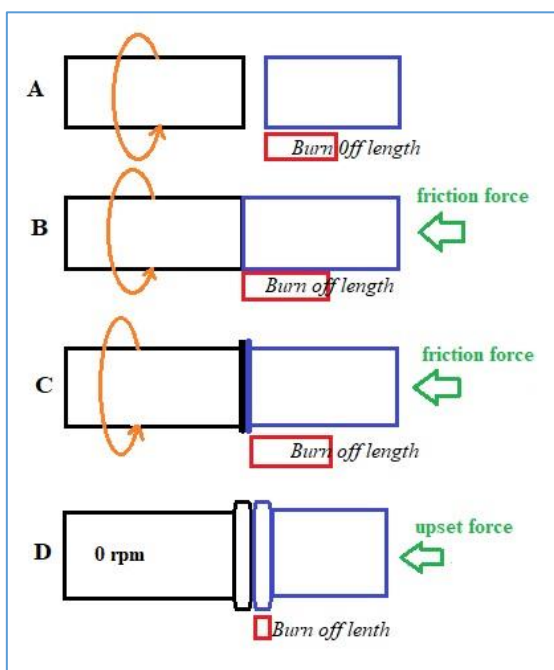
Bentuk daerah sambungan las (HAZ) dipengaruhi oleh *friction pressure* dan *rotational speed*. Jika pemberian tekanan terlalu tinggi atau putaran mesin terlalu rendah, maka daerah sambungan las menyempit seperti yang terlihat pada gambar 2.4 (a). Sebaliknya, jika pemberian tekanan terlalu rendah atau putaran mesin terlalu tinggi, maka daerah sambungan las akan melebar seperti yang terlihat pada gambar 2.4 (b).



Gambar 2.5 Pengaruh *Friction Pressure* dan *Rotational Speed* Pada HAZ
Sumber: Srija dan Reddy (2015,p.1685)

2.4.4 *Burn-off length*

Burn-off length adalah material yang terdeformasi plastis pada permukaan gesekan yang diakibatkan oleh panas yang dihasilkan gesekan antara kedua material dan gaya penekanan dari mesin pada saat pengelasan. Material yang terdeformasi tersebut mengakibatkan pemendekan dari geometri benda kerja. Setelah material diberikan *burn-off length* dengan panjang tertentu, tahapan selanjutnya dapat dilakukan (Bhamji et al, 2011), yaitu penghentian *rotational velocity* dan pemberian *upset force*. Penjelasan *Burn-off length* ditunjukkan pada gambar 2.6



Gambar 2.6 Burn-off length

2.4.5 Energi Pada Sambungan Las

Pada metode pengelasan *continuous drive friction welding*, terdapat kalor atau energi panas yang diakibatkan dari gesekan kedua permukaan benda kerja. Energi panas tersebut akan menyebar ke seluruh bagian benda kerja. Berikut adalah persamaan- persamaan yang mengakibatkan energi panas tersebut :

$$dQ = \omega \cdot dM \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-1)$$

Dimana ω adalah kecepatan sudut (*angular velocity*) dan dM adalah diferensial momen torsi pada ketebalan penampang lingkaran yang bergesekan (dr). besar dari momen torsi dapat dihitung menggunakan rumus :

$$dM = r \cdot dF_{\text{friction}} \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-2)$$

Dimana dF_{friction} adalah gaya gesek (*friction force*) pada lingkaran dengan tebal dr , dan r adalah jari- jari lingkaran tersebut. Selanjutnya dF_{friction} didefinisikan bahwa setara dengan perkalian antara koefisien gesek dengan gaya tekan (P) pada arah aksial di lingkaran dengan tebal (dr). Karena gesekan terjadi pada luas permukaan material yang bergesekan dengan tebal lingkaran (dr), maka gaya gesek dikalikan dengan luas permukaan yang bergesekan.

$$dF_{\text{friction}} = \mu \cdot P \cdot 2\pi r \cdot dr \dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-3)$$

Lalu substitusikan persamaan (2-3) dan (2-4) pada persamaan (2-2), sehingga didapatkan :

$$dQ = \omega \cdot r \cdot (\mu \cdot P \cdot 2\pi r \cdot dr) \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-4)$$

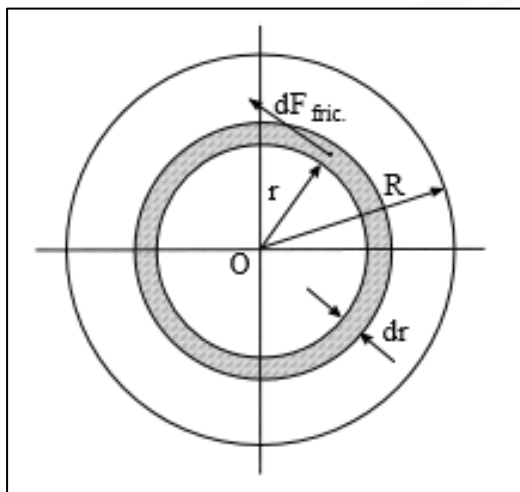
$$dQ = 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-5)$$

Untuk mencari nilai kalor pada permukaan las dapat dilakukan dengan cara mengintegalkan R (pada gambar 2.6) pada persamaan (2-6), sehingga:

$$dQ = \int_0^R 2\pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^2 \cdot dr \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-6)$$

$$Q = 2 \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot \frac{r^3}{3} \Big|_0^R \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-7)$$

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \pi \cdot \mu \cdot \omega \cdot P \cdot r^3 \dots\dots\dots(\text{Sahin, 2010}) \quad (2-8)$$



Gambar 2.7 Friction Surface (permukaan gesekan)

Sumber : Sahin (2010)

Keterangan :

Q : Besar energi per satuan waktu yang terjadi permukaan las (Watt) (1 Watt = 0,2388 Kalori/s)

P : Friction pressure (N/m²)

ω : Kecepatan sudut (rad/s)

r : Jari-jari benda kerja/ permukaan yang bergesekan (m)

μ : Koefisien gesek

dengan :

Q : Besar energi per satuan waktu yang terjadi permukaan las (Watt) (1 Watt = 0,2388 kalori/s)

P : Friction pressure (N/m²)

ω : Kecepatan sudut (rad/s)

R : Jari-jari benda kerja/ permukaan yang bergesekan (m)

μ : Koefisien gesek

2.5 Perpindahan Panas

2.5.1 Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan panas pada suatu zat yang mengalir melalui zat perantara tanpa disertai perpindahan zat perantara tersebut. Konduksi dirumuskan sebagai berikut.

$$Q = \frac{k.A. (T_1 - T_2)}{L} \quad (2-9)$$

dengan :

- Q : Laju perpindahan panas (Watt) (1 Watt = 0,2388 kalori/s)
- k : Konduktivitas termal (W/m⁰C)
- A : Luas permukaan (m²)
- T₁ : Temperatur pada titik awal (⁰C)
- T₂ : Temperatur pada titik akhir (⁰C)
- L : Panjang perambatan (m)

2.5.2 Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas melalui zat perantara berupa fluida (gas atau cairan). Konveksi dirumuskan sebagai berikut.

$$Q = h. A_s. (T_s - T_\infty) \quad (2-10)$$

dengan :

- Q : Laju perpindahan panas (Watt) (1 Watt = 0,2388 kalori/s)
- h : Koefisien perpindahan panas konveksi (W/ m². ⁰C)
- A_s : Luas permukaan (m²)
- T_s : Temperatur permukaan benda (⁰C)
- T_∞ : Temperatur fluida atau temperatur lingkungan (⁰C)

2.6 Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga adalah sebuah metode yang berguna untuk memecahkan masalah secara formulasi matematik. Dan untuk lebih mudahnya digunakan teknik numerik.

Konsep dari metode elemen hingga adalah membagi suatu struktur geometri menjadi elemen- elemen yang lebih kecil dengan dimensi berhingga. Sedangkan struktur asli diasumsikan sebagai rangkaian dari elemen- elemen kecil tersebut. Selain itu, elemen- elemen tersebut dihubungkan melalui *joint* yang memiliki jumlah berhingga atau dapat

disebut sebagai node atau titik *node*. Setelah itu, properti dari masing- masing elemen tersebut dihitung sehingga properti secara keseluruhan akan diketahui.

Rumus keseimbangan dari setiap elemen menghasilkan rumus keseimbangan dari keseluruhan struktur tersebut yang menyebabkan terjadinya kesinambungan antar node. Kemudian, kondisi batas dibebankan pada struktur tersebut agar mampu mengetahui nilai dari variabel yang diinginkan.

2.7 Software Berbasis Elemen Hingga

Salah satu *software* berbasis elemen hingga adalah ANSYS. *Software* ini mampu untuk mendiskritisasi model dengan sangat halus, menghasilkan hasil dengan nilai ketelitian yang tinggi, dan mampu bekerja pada elemen yang banyak. *Software* ini digunakan untuk menganalisis berbagai hal, antara lain: analisis elektrik, analisis fluida, analisis magnetis analisis *structural*, dan analisis *thermal*.

Pada proses penggunaan *software* tersebut, terdapat beberapa langkah yang biasanya dilakukan, antara lain:

a. *Preprocessing* (proses awal).

Preprocessing memiliki beberapa tahap sebagai berikut:

- Pendefinisian masalah.
- Pemilihan tipe elemen yang berfungsi untuk mendiskritisasi model yang dibuat.
- Memasukkan data material.
- Pembuatan gambar geometri yang dapat dibuat dalam bentuk 1 dimensi, 2 dimensi, maupun 3 dimensi
- *Meshing* atau pengaturan tipe elemen dan pendiskritisasi struktur elemen tak hingga menjadi berhingga.
- Mendefinisikan analisis solusi yang akan digunakan.
- Memasukkan dan mengatur *boundary conditions* atau kondisi batas yang akan digunakan.

b. *Solution* (proses solusi).

Solving, adalah proses penyelesaian masalah yang menggunakan perhitungan *numerical* yang dilakukan oleh komputer.

c. *General post processing* (proses pembacaan hasil).

General post processing memiliki beberapa tahap sebagai berikut:

- *Plot result*, yakni penampilan hasil dari proses solving yang ditampilkan dalam bentuk *contour plot*. *Contour plot* ditampilkan dalam bentuk gradasi warna yang

menggambarkan tentang tingkatan distribusi nilai variabel yang dihasilkan. Sehingga memudahkan di dalam memahami informasi tersebut.

- *List result*, yakni penampilan hasil analisis yang ditampilkan dalam bentuk tabel yang memberikan informasi secara detail mengenai nilai variabel yang dihasilkan.
- *Animation*, yakni pemberitahuan informasi yang digambarkan dengan *contour plot*. Namun untuk *animation*, *contour plot* tersebut ditampilkan dalam bentuk animasi video. Video tersebut menggambarkan tentang perkembangan dari kondisi awal sampai kondisi akhir variabel yang dihasilkan dari analisis tersebut. Sehingga mampu memahami informasi secara mudah.

2.7.1 Coupled thermal analysis (Transient Thermal – Static Structural)

Analisis struktural-termal memungkinkan Anda untuk melakukan analisis tegangan termal. Dalam analisis dinamis, Anda juga dapat menyertakan efek piezocaloric. Aplikasi yang terakhir termasuk redaman termoelastik pada logam dan perangkat MEMS seperti balok resonator.

a. Elemen yang Digunakan dalam Analisis Termal Struktural

Program ini mencakup berbagai elemen yang dapat Anda gunakan untuk melakukan analisis struktural-termal gabungan. Tabel 2.4: Elemen yang Digunakan dalam Analisis Termal-Struktural meringkasnya. Untuk deskripsi rinci tentang elemen dan karakteristiknya (DOF, opsi KEYOPT, input dan output, dll.), Lihat Referensi Elemen.

2.8 Hipotesis

1. Semakin panjang tinggi kerucut maka nilai temperatur maksimum akan semakin kecil karena luas kontak permukaan pada saat *friction time* menjadi lebih sempit sehingga menghasilkan *heat input* yang lebih kecil.
2. Semakin panjang *burn-off length* maka distribusi temperatur akan semakin luas, dikarenakan area kontak gesek yang terpengaruh panas semakin besar.

BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian menggunakan metode simulasi berbasis *software* Ansys Workbench yang bertujuan untuk mendapatkan hasil perkiraan dari eksperimen yang sebenarnya. Metode ini dipakai untuk mendapatkan hasil perkiraan dari metode *true experimental*.

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian dilakukan pada 8 Desember 2017 s.d. selesai. Adapun pelaksanaannya di Studio Perancangan dan Rekayasa Sistem Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.

3.2 Variabel Penelitian

Dalam penelitian ini terdapat tiga variabel yaitu variabel bebas, variabel terikat, dan variabel terkontrol.

3.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang dapat diubah sehingga variabel ini dapat mempengaruhi hasilnya. Nilai dari variabel ini ditentukan oleh peneliti agar memperoleh hubungan antara variabel bebas dan variabel terikatnya. Variabel bebas di penelitian ini adalah

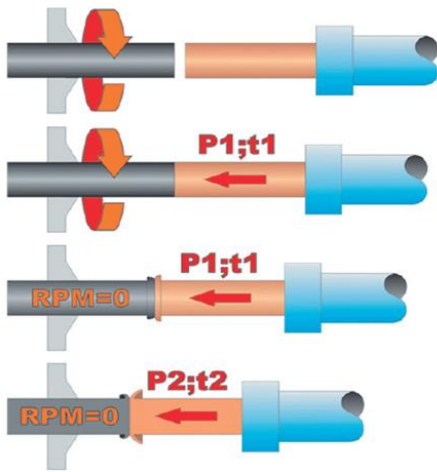
- Tinggi kerucut: 0 mm, 1 mm, 2 mm dan 3 mm.
- *Burn-off Length*: 3 mm, 5 mm dan 7 mm.
- *Friction time* disesuaikan dengan penelitian Dheni (2017)

Tabel 3.1

friction time pada masing-masing variasi (ket. H_i : Tinggi kerucut i mm ; BOL i : *burn-off length* i mm)

	H0	H1	H2	H3
BOL 3	1.57s	2.21s	2.1933s	2.6967s
BOL 5	2.69s	2.79s	2.8033s	3.1867s
BOL 7	3.67s	3.84s	3.9633s	4.04s

Sumber : Dheni (2017)



Gambar 3.1 Continuous Drive Friction Welding
Sumber: Alves (2012)

3.2.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besar nilainya tergantung oleh variabel bebas. Variabel terikat di penelitian ini adalah distribusi temperatur

3.2.3 Variabel Kontrol

Variabel kontrol adalah variabel yang besarnya dikendalikan selama penelitian. Variabel kontrol di penelitian ini yaitu :

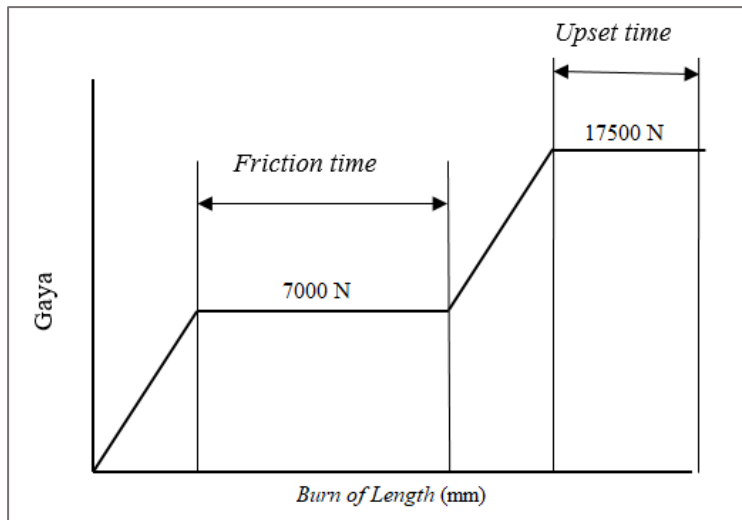
1. Gaya penekanan hidrolik pada proses pengelasan 7000 N yang disubstitusi menjadi *displacement load* pada *software FEM* sesuai *burn-off length* selama *friction time* pada masing-masing variasi
2. Gaya penekanan hidrolik pada saat *upset* 17500 N selama 10 detik yang disubstitusi menjadi *displacement load* pada *software FEM* yang menurut total deformasi pada masing-masing variasi berdasarkan penelitian sebenarnya.

Tabel 3.2
Total deformasi pada masing-masing variasi

BOL (mm)	H0 (mm)	H1 (mm)	H2 (mm)	H3 (mm)
3	9.93	10.68	9.01	8.68
5	12.93	12.75	11.98	11.96
7	17.40	16.22	15.79	14.54

Sumber : Dheni (2017)

3. Putaran spindle 1600 rpm
4. *Upset time* 10 detik



Gambar 3.2 Skema Pemberian Gaya Tekan Awal dan Akhir

3.3 Prosedur Penelitian

Adapun prosedur penelitian dari simulasi *continuous drive friction welding* adalah sebagai berikut.

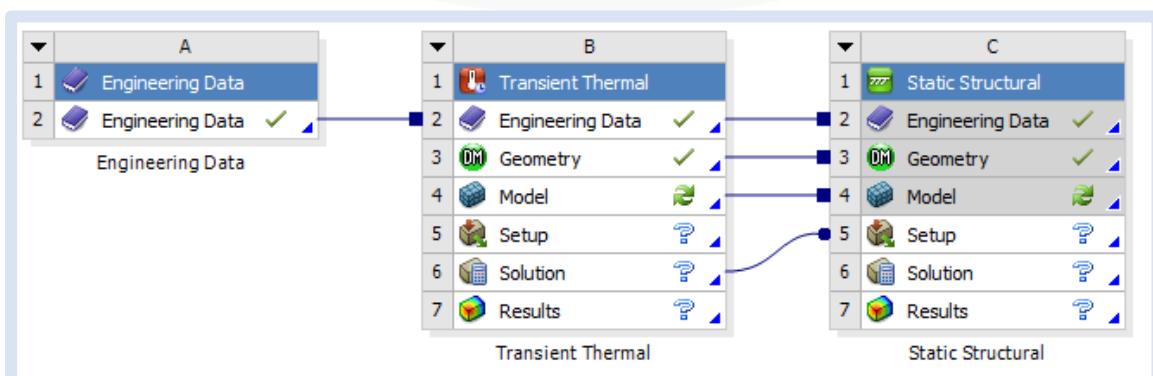
3.3.1 Studi literatur

Mempelajari berbagai jurnal, buku, dan artikel- artikel yang berbungan dengan penelitian pada kali ini, yaitu tentang *continuous drive friction welding*.

3.3.2 Permodelan material

a. Jenis Analisa (*transient thermal-static structural*)

Penelitian ini mencari distribusi temperatur dan temperatur maksimum pada sambungan las gesek CDFW maka dari itu metode analisis yang mendekati persamaan yang diinginkan adalah dengan menggunakan metode analisis *transient thermal - static structural*.



Gambar 3.3 Analisia Transient Thermal- Static Structural

b. *Engineering Data*

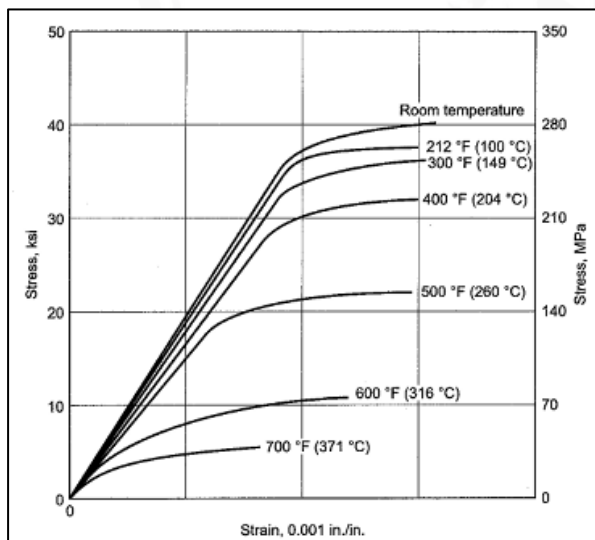
Sebelum melakukan permodelan benda kerja, diperlukan penyesuaian data material yang akan digunakan menurut *material properties* untuk masing masing benda kerja yaitu dengan cara memasukkan data material sesuai tabel 3.2 dan tabel 3.3 untuk material Al 6061 sedangkan tabel 3.4 untuk material St 41 kedalam *software* ANSYS melalui menu *Engineering Data*.

Tabel 3.2

Material Properties dari Aluminium AL-6061 terhadap perubahan temperatur

<i>Material Properties</i>		<i>Density</i> (kg/m ³)	<i>Young Modulus</i> (GPa)	<i>Poisson's Ratio</i>	<i>Thermal Conductivity</i> (W/m ⁰ C)	<i>Specific Heat</i> (J/Kg ⁰ C)
<i>Temperatur</i>	37,8 (°C)	2690	68,5	0,33	162	945
	93,3 (°C)	2690	66,2	0,33	177	978
	149 (°C)	2670	63,1	0,33	184	1000
	204 (°C)	2660	59,2	0,33	192	1030
	260 (°C)	2660	54	0,33	201	1052
	316 (°C)	2630	47,5	0,33	207	1080
	371 (°C)	2630	40,3	0,33	217	1100
	427 (°C)	2600	31,7	0,33	223	1130

Sumber: Khan (2011:183)



Gambar 3.4 Grafik tegangan-regangan Material AL-6061 terhadap Perubahan Suhu

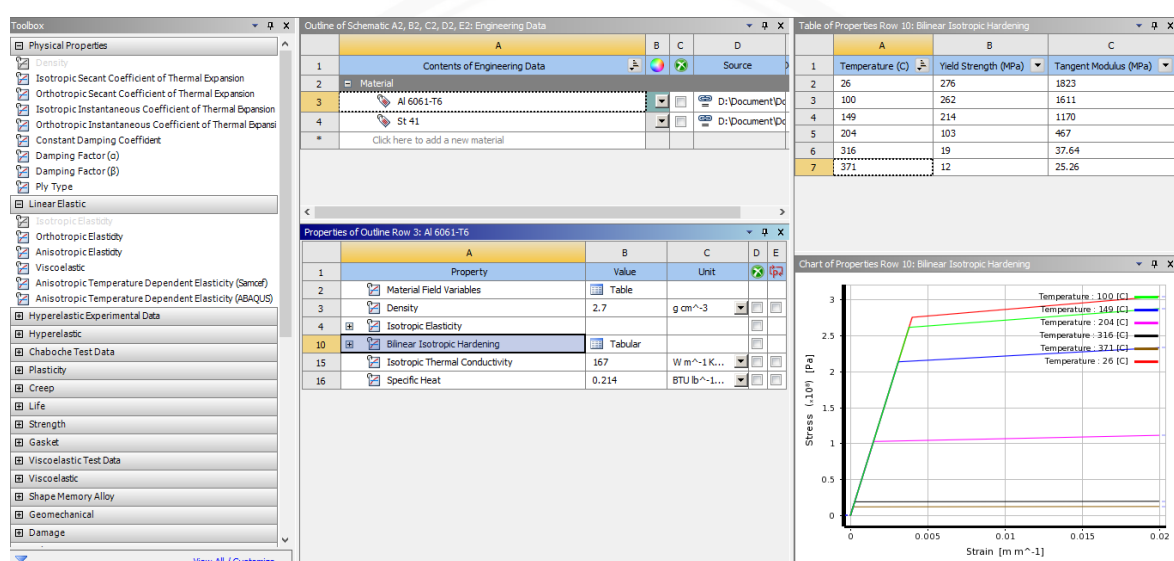
Sumber : ASM Atlas Handbook (2002 :406)

Tabel 3.3

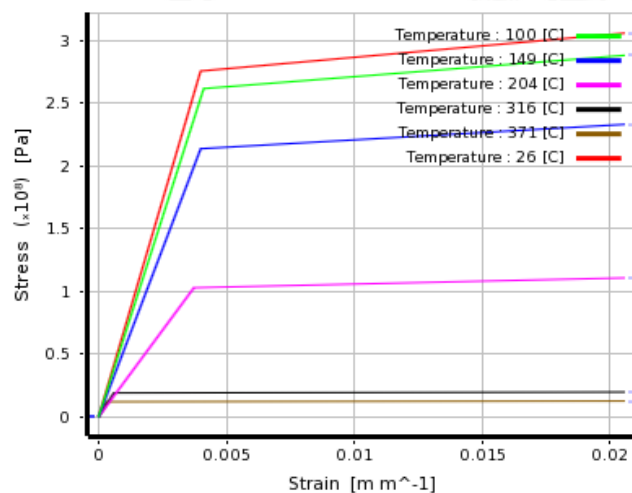
Tegangan regangan berbagai temperatur material Al-6061

No	Temperatur (°C)	Yield Strength (Mpa)	Strain (%)	Ultimate Strength (Mpa)	Tangent Modulus (Mpa)
1	26	276	17	310	1823
2	100	262	18	290	1611
3	149	214	20	234	1170
4	204	103	28	131	467
5	316	19	85	32	37.64
6	371	12	95	24	25.26

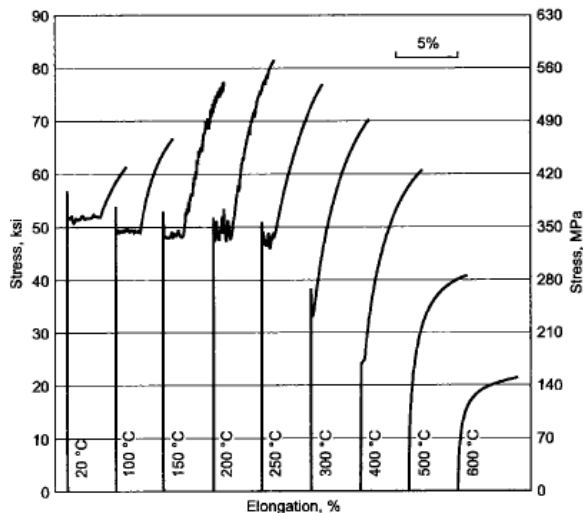
Sumber : ASM Atlas Handbook (2002 :406)



Gambar 3.5 Engineering Data material Al-6061



Gambar 3.6 Pemodelan Kurva tegangan-regangan berbagai temperatur material Al-6061 pada Software FEM



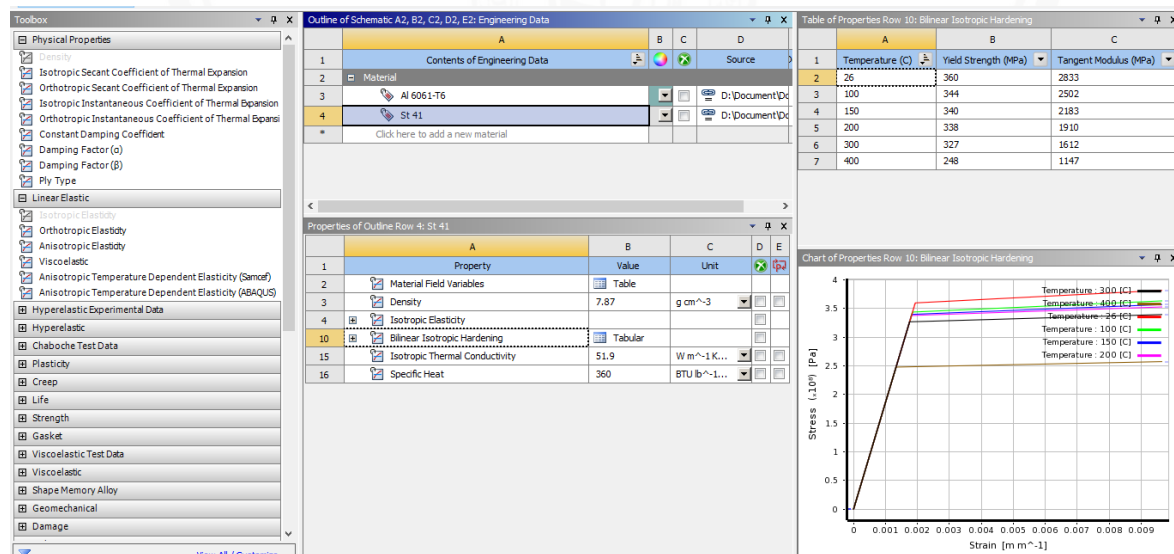
Gambar 3.7 Grafik tegangan regangan material ST-41 terhadap temperatur
Sumber: ASM Hand Book Vol.1 (2007:947)

Tabel 3.4

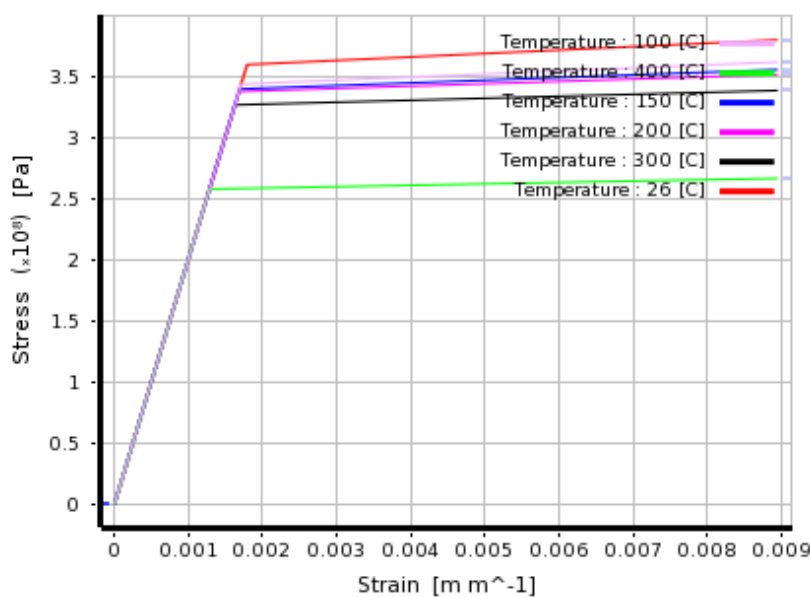
Tegangan regangan berbagai temperatur material St-41

no	Temperatur (°C)	Yield Strength (Mpa)	Strain (%)	Ultimate Strength (Mpa)	Tangent Modulus (Mpa)
1	20	360	15	425	2833
2	100	344	18.3	458	2502
3	150	340	24	524	2183
4	200	338	29	554	1910
5	300	327	32.5	524	1612
6	400	248	36.6	420	1147

Sumber: ASM Hand Book Vol.1 (2007:947)



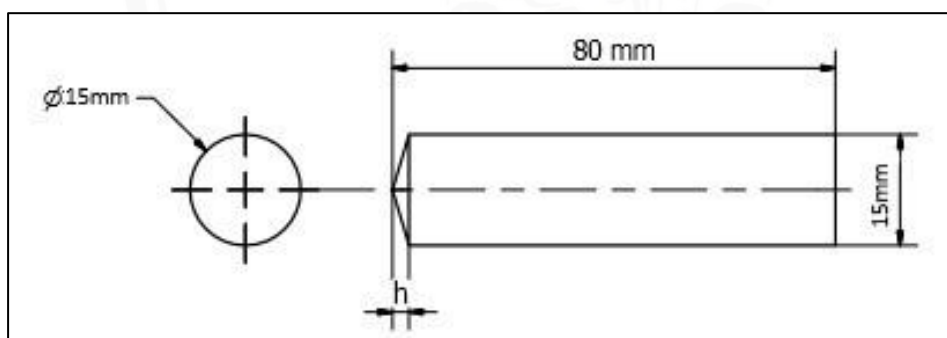
Gambar 3.8 Engineering Data material St 41



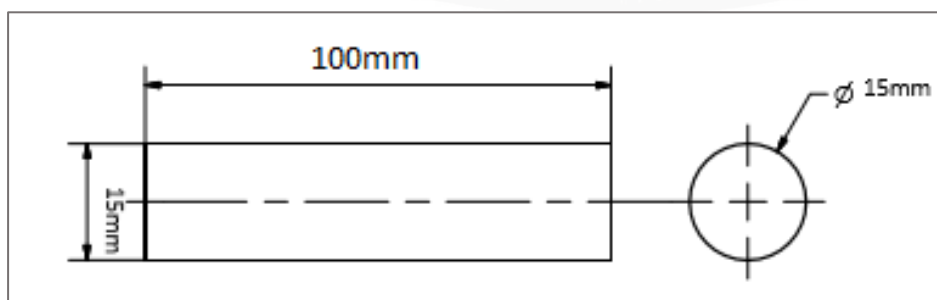
Gambar 3.9 Permodelan Kurva tegangan-regangan pada berbagai temperatur material ST-41 pada *Software FEM*

c. Geometri Benda Kerja

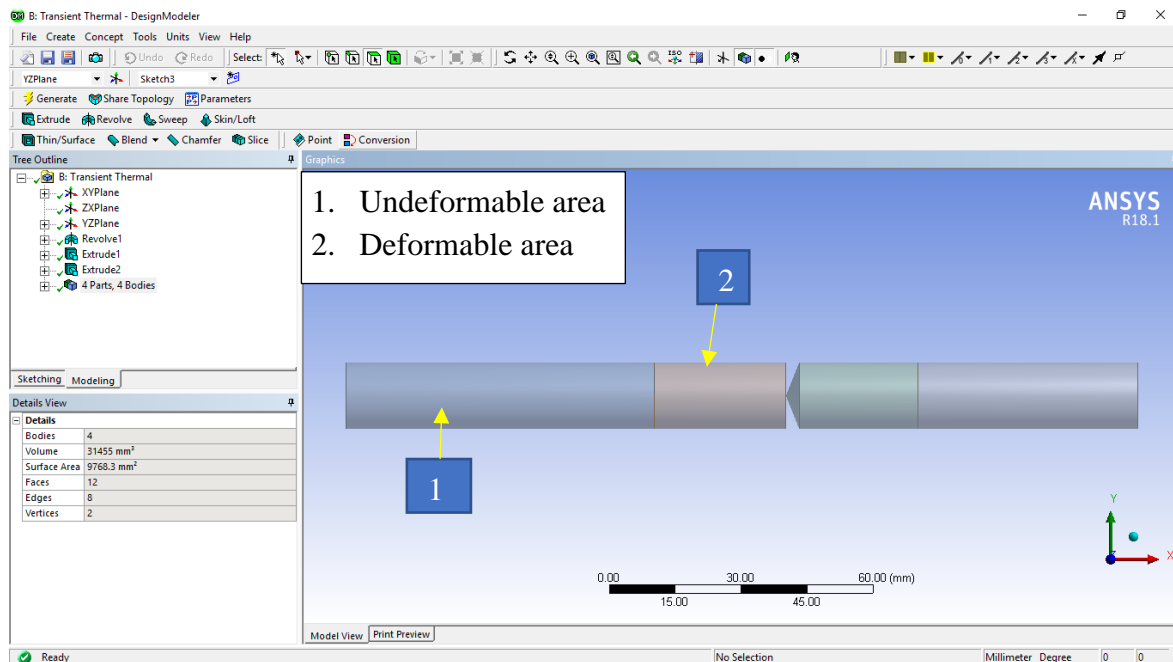
Dimensi spesimen yang digunakan pada penelitian ini dibuat seperti dengan penelitian Dheni (2017) yaitu poros pejal dengan dimensi spesimen yang ditunjukkan pada gambar berikut ini



Gambar 3.10 Dimensi spesimen ST-41



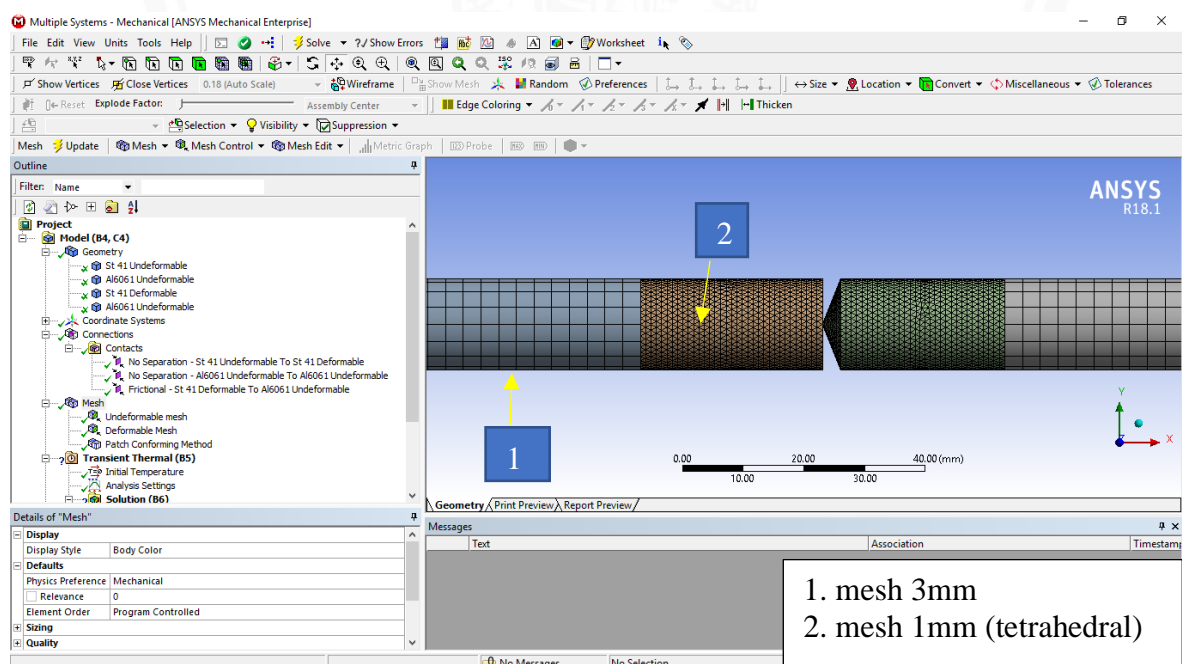
Gambar 3.11 Dimensi spesimen Al 6061



Gambar 3.12 Model Benda Kerja pada ANSYS workbench

Permodelan geometri benda kerja pada ANSYS di bagi menjadi 2 bagian yaitu bagian yang terdeformasi dan bagian yang tidak terdeformasi. Adapun macam macam variasi pada penelitian ini dapat dilihat pada tabel 3.1.

d. Modeling



Gambar 3.13 Meshing Benda Kerja

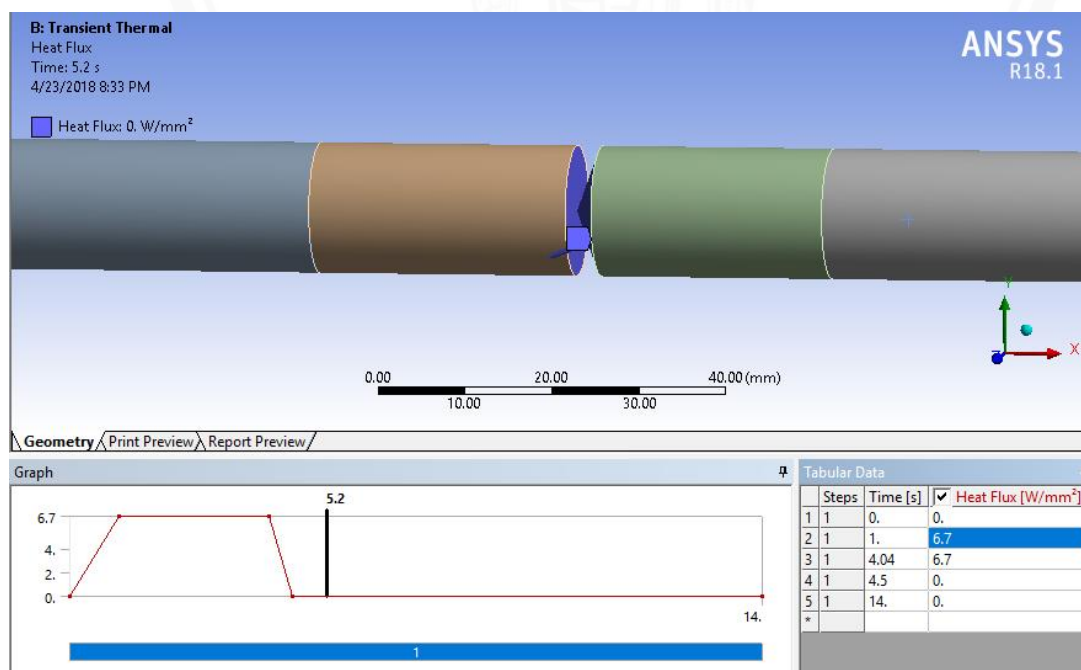
Modeling benda kerja pada penelitian ini bertujuan untuk menempatkan *material properties* yang telah di atur sebelumnya pada *Engineering Data* pada masing-masing bagian dari model benda kerja itu sendiri. Kemudian untuk mengatur jenis *connection* pada penelitian ini, adapun jenis *connection* yang digunakan ialah *no separation* untuk mendefinisikan hubungan bagian yang terdeformasi dan yang tidak terdeformasi pada benda kerja yang sama. Lalu *frictional connection* untuk mendefinisikan hubungan antara material yang saling bergesekan. Kemudian yang ketiga ialah untuk mengatur ukuran mesh dan metode mesh yang digunakan, pada penelitian ini ukuran mesh yang digunakan mesh dengan ukuran 3mm untuk bagian benda kerja yang tidak terdeformasi dan mesh ukuran 1mm dengan metode tetrahedral untuk bagian benda kerja yang terdeformasi.

e. *Setup Analisa Transient thermal*

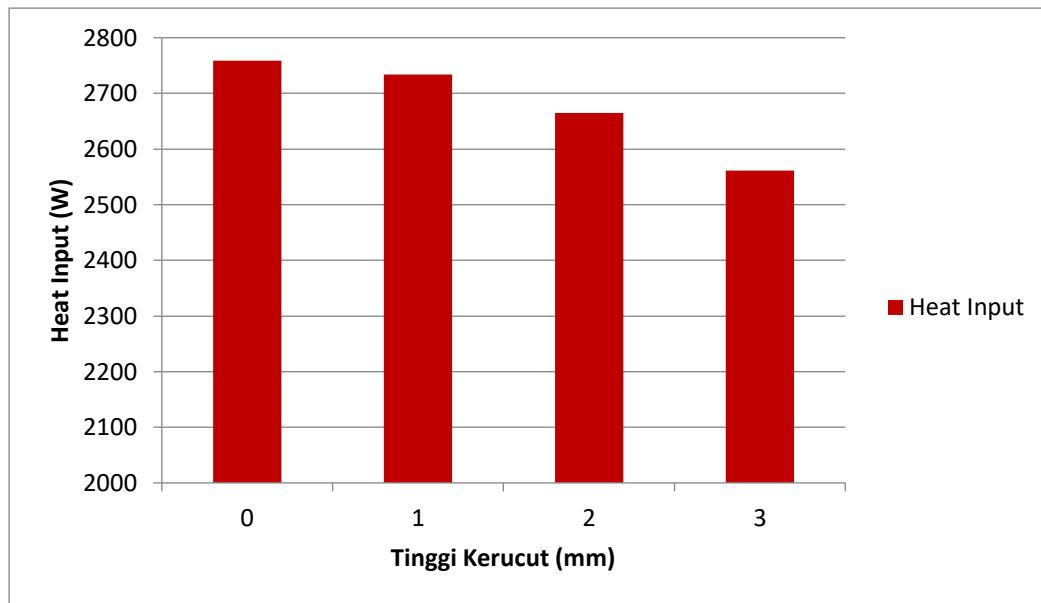
Tujuan dari analisa *transient thermal* itu sendiri ialah untuk memperoleh *output* berupa *body temperature*. Adapun *load* yang digunakan adalah :

- *Heat flux*

Nilai *heat flux* yang digunakan pada masing masing variasi tinggi kerucut berbeda sesuai dengan perhitungan menggunakan rumus *heat input* yang sudah dijelaskan pada BAB II. *Load heat flux* di tempatkan pada *interface* kedua benda kerja yang saling bergesekan di tunjukan pada gambar 3.14.



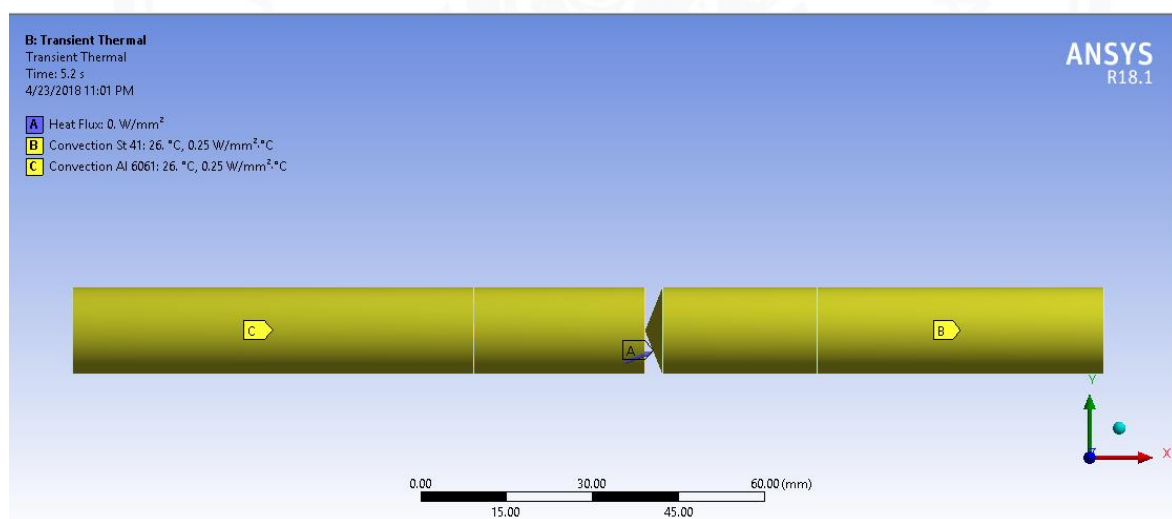
Gambar 3.14 Contoh Load heat flux



Gambar 3.15 Grafik *heat input* pada masing-masing variasi tinggi kerucut

- *Convection*

Nilai konveksi untuk benda kerja yang berputar sebesar $3.5e-005 \text{ W/mm}^2$ dan $2.5e-005 \text{ W/mm}^2$ untuk benda kerja yang diam.



Gambar 3.16 Setup *Transient Thermal*

f. *Setup analisa static structural*

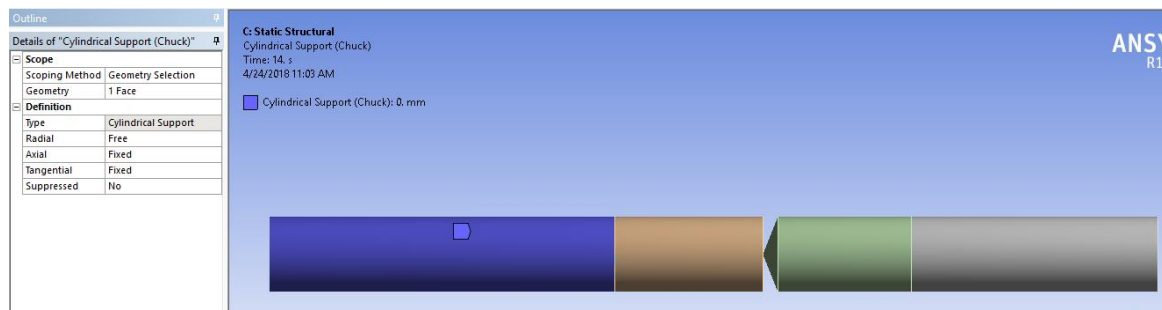
Pada penelitian ini jenis analisa *static structural* digunakan untuk memperoleh *output* berupa total deformasi yang terjadi pada proses pengelasan CDFW Al-6061 dan St 41. Adapun *load* yang digunakan pada *setup static structural* adalah :

- *Imported body temperature*

Nilai dari *load* ini di peroleh dari hasil perhitungan *transient thermal*.

- *Cylindrical support*

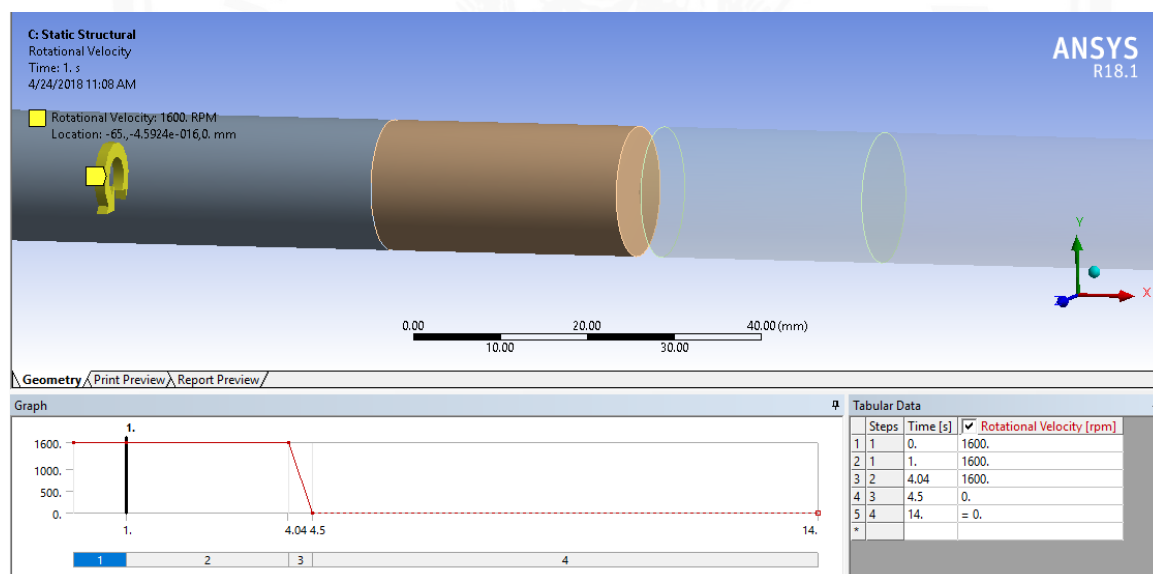
Cylindrical support free radial untuk benda yang berputar dan *Cylindrical Support free axial* untuk benda yang di beri *upset force*.



Gambar 3.17 Cylindrical Support load

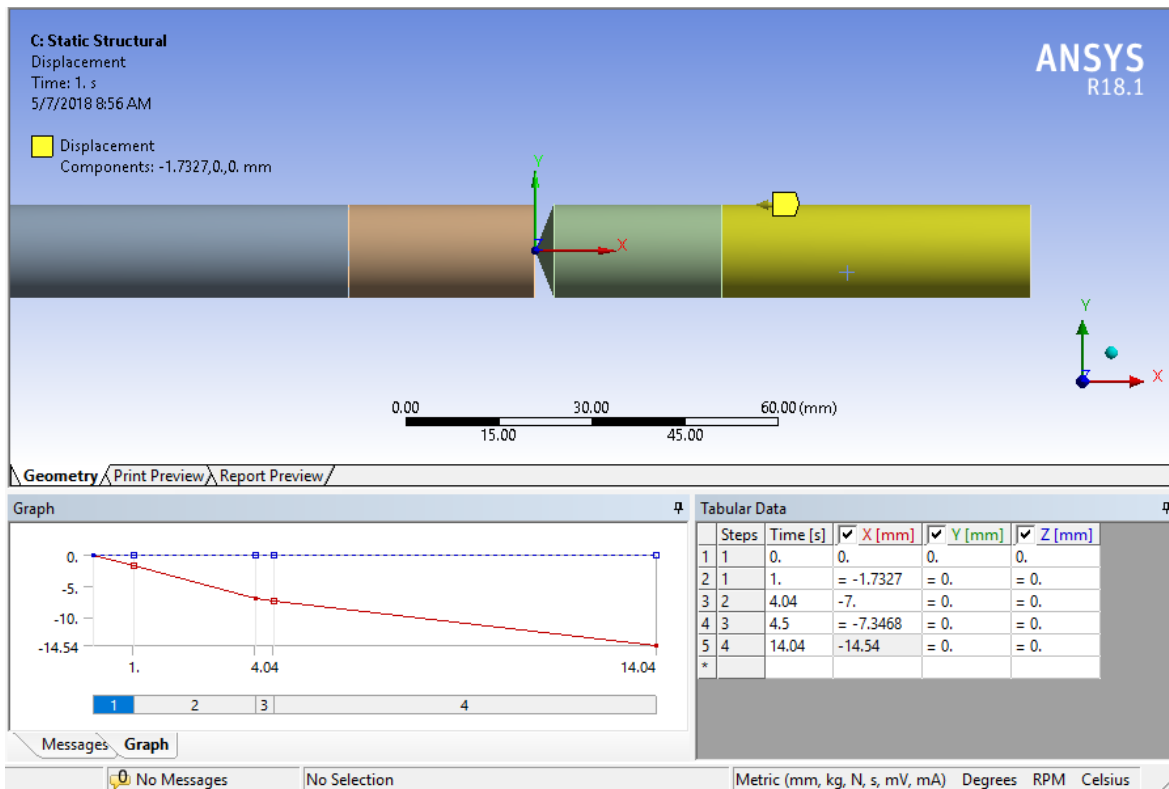
- *Rotational Velocity*

Rotational velocity di berikan pada benda kerja yang berputar yaitu pada material Al 6061. Load ini diberikan selama waktu *friction time*

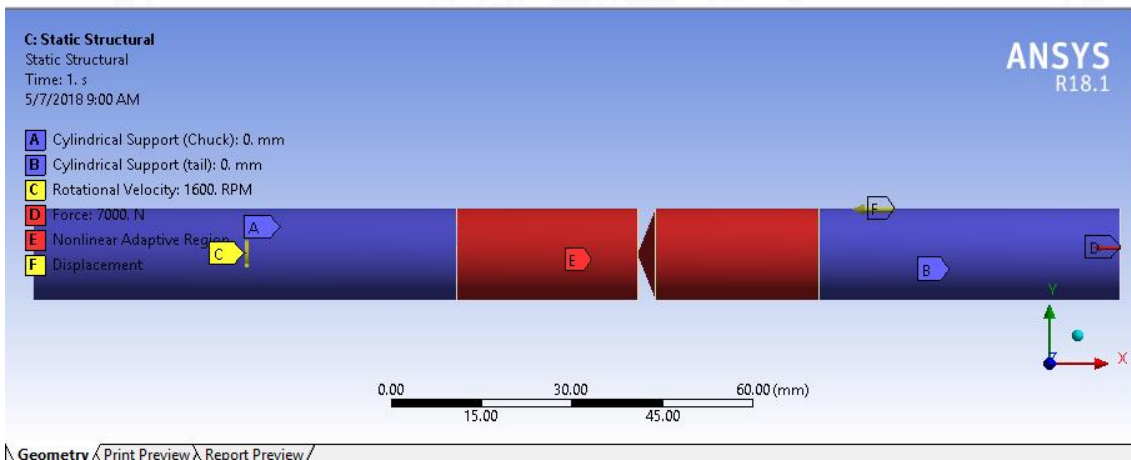


Gambar 3.18 Rotational Velocity load

- Penerapan *Displacement Load* sebagai substitusi dari *Force Load*



Gambar 3.19 Displacement Load

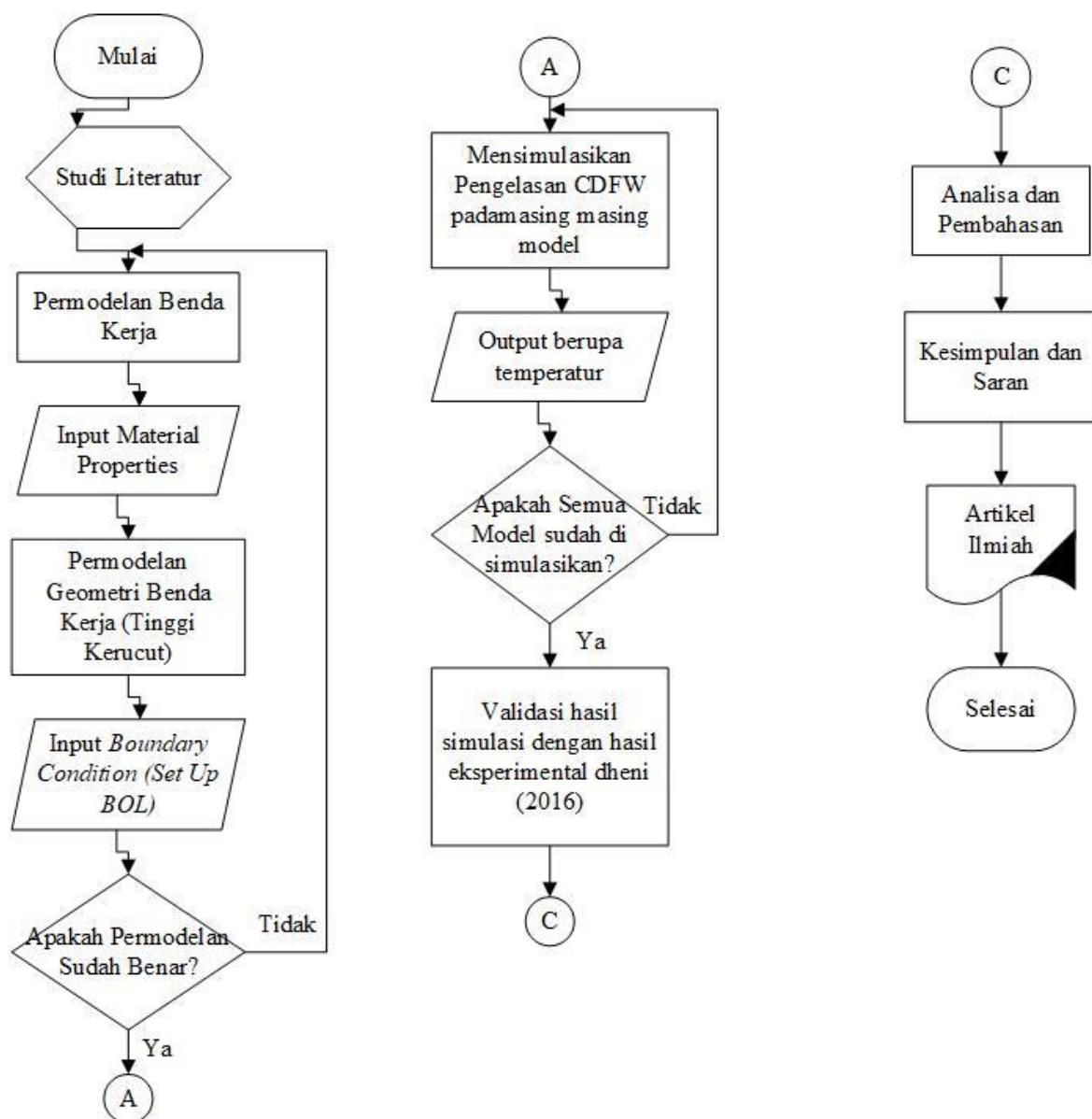


Gambar 3.20 Setup Static Structural

3.3.3 Solution

Sesuai jenis analisa *software* ANSYS diatur untuk mengeluarkan output berupa temperatur untuk *transient thermal analysis* dan Output berupa total deformasi untuk *static structural analysis*.

3.4 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.18 Diagram Alir Penelitian

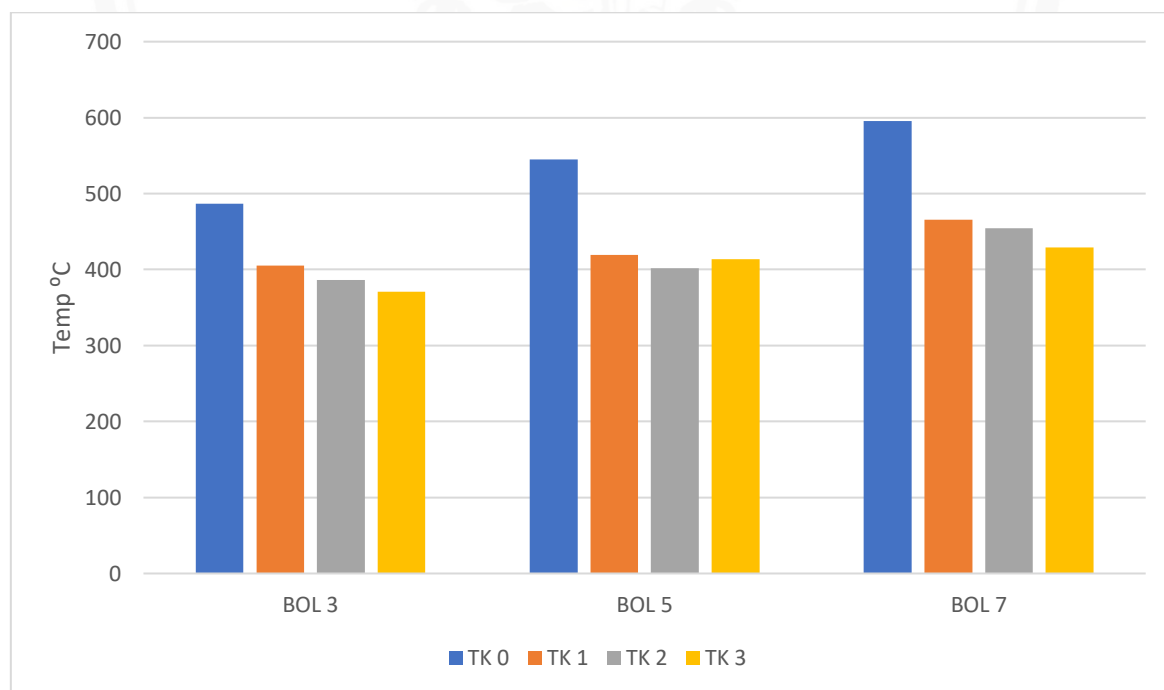
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data dan Analisa Pengaruh Tinggi Kerucut dan *Burn-off Length* terhadap Temperatur Maksimum Benda Kerja

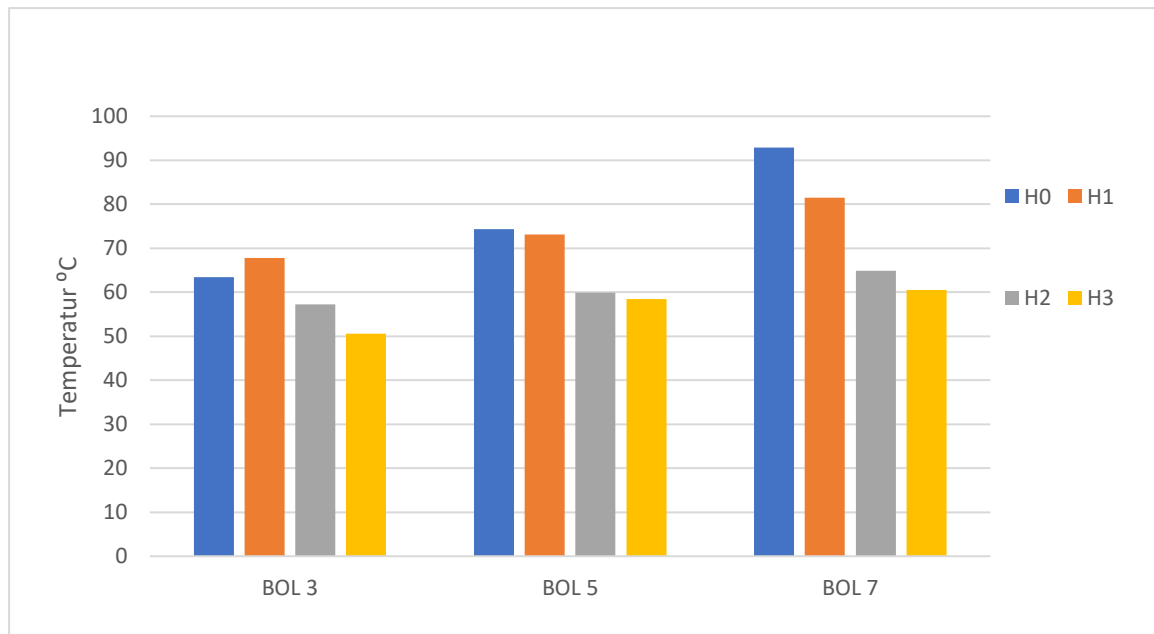
Pengambilan data dilakukan dengan metode simulasi yang kemudian di bandingkan dengan data temperature metode *true-experimental* guna memverifikasi kedua data agar data yang di dapat bias di anggap *valid*. Data hasil simulasi dianggap valid apabila memiliki kecenderungan yang sama dengan data hasil eksperimen.. Pada verifikasi data kali ini data yang diambil adalah satu data pada temperatur tertinggi pada masing-masing metode penelitian.

Tabel 4.1
Data Temperatur Maksimum Benda Kerja pada metode simulasi

	BOL 3	BOL 5	BOL 7
TK 0	486.36	544.77	595.39
TK 1	405.13	419.37	465.65
TK 2	386.49	402.05	454.55
TK 3	370.64	413.57	429.1



Gambar 4.1: Grafik Pengaruh Tinggi Kerucut satu sisi dan *burn-off-length* terhadap temperatur maksimum metode Simulasi CDFW A6061-ST41 (ket. TK i : Tinggi Kerucut i mm. BOL i : *burn-off-length* i mm)



Gambar 4.2: Grafik Pengaruh Tinggi Kerucut satu sisi dan *burn-off length* terhadap temperatur maksimum metode *true experimental* CDFW A6061-ST41 dengan menggunakan alat ukur *infra red thermogun* (ket. H_i : Tinggi Kerucut i mm. BOL i : *burn-off length* i mm)

4.1.1 Analisa Pengaruh Tinggi Kerucut dan *Burn-off Length* terhadap Temperatur Maksimum

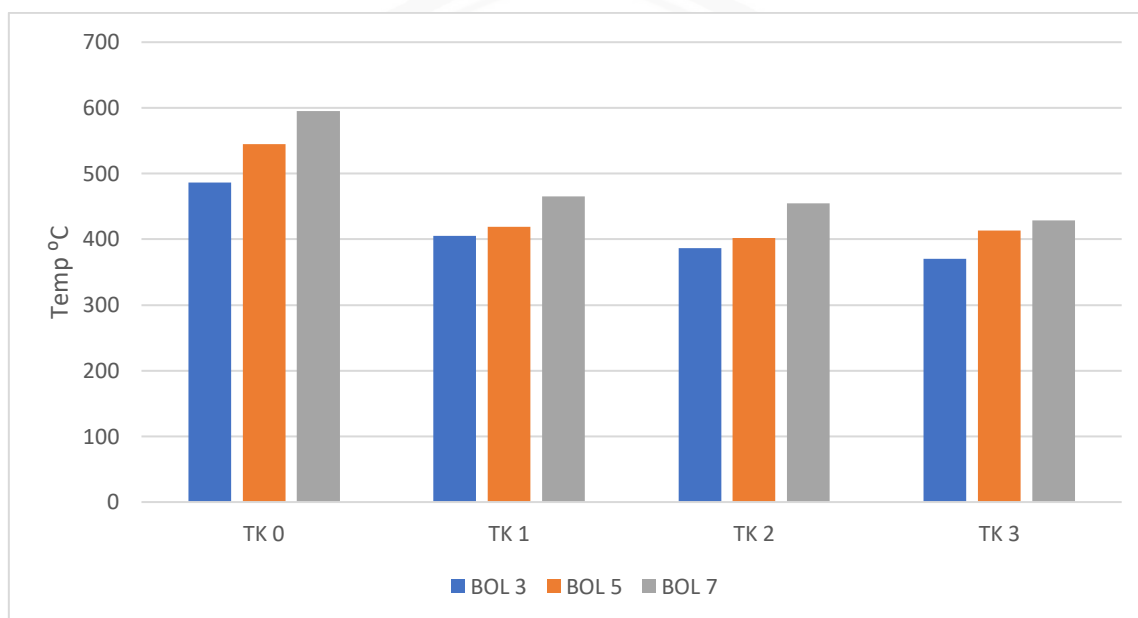
Hasil dari analisa data tinggi kerucut dan *burn-off length* ditampilkan pada gambar 4.3, yang menunjukkan bahwa variasi tinggi kerucut dan *burn-off length* mempengaruhi temperatur maksimum benda kerja (Al-6061). Dari gambar 4.3 dapat kita amati bahwa nilai temperatur maksimum tertinggi terjadi pada variasi tinggi kerucut 0 mm dan *burn-off length* 7 mm dengan temperatur maksimum $595,39^{\circ}\text{C}$. Sedangkan pada temperatur maksimum terendah terjadi pada variasi tinggi kerucut 3 mm dan *burn-off length* 3 mm yaitu $370,64^{\circ}\text{C}$. Temperatur tersebut diambil pada permukaan benda yang terjadi *flash*

Pada penelitian sebelumnya (Dheni, 2016), gambar 4.2 terlihat grafik yang didapatkan dari perbandingan antara tinggi kerucut dengan temperatur maksimum rata-rata. Grafik tersebut menunjukkan temperatur maksimum rata rata yaitu $92,9^{\circ}\text{C}$ untuk tinggi kerucut 0 mm BOL 7mm dan sangat jauh berbeda dengan metode simulasi yang memiliki temperatur maksimum pada variasi benda kerja yang sama yaitu $595,39^{\circ}\text{C}$

Hal ini disebabkan karena pada penelitian tersebut temperatur maksimum diambil pada saat *friction time*. Pengambilan data dilakukan dengan menembakkan laser *thermogun* kearah sambungan benda kerja (Al6061) atau permukaan yang mengalami gesekan. Temperatur yang didapat adalah temperatur yang terdapat pada permukaan benda kerja (Al6061) saja. Akan tetapi respon *thermal* dari *thermogun* yang digunakan kurang responsif

sehingga menyebabkan ketidak valid-an pembacaan temperature. Mengingat logam Al membutuhkan temperatur $\pm 400^{\circ}\text{C}$ untuk dapat terdeformasi

Dari gambar 4.2 dan 4.1 terlihat grafik yang memberikan informasi bahwasannya temperatur maksimum cenderung menurun ketika tinggi kerucut semakin tinggi. Hal ini disebabkan pada saat awal friction time benda kerja yang memiliki kerucut kecil mengalami area gesek yang lebih luas. Sedangkan pada kerucut yang lebih tinggi memiliki area awal gesekan yang lebih sempit dan bertahap untuk memiliki area kontak gesek yang lebih besar. Sehingga benda kerja yang kerucutnya lebih kecil memiliki total heat flux yang lebih besar.



Gambar 4.3: Grafik Pengaruh Tinggi Kerucut satu sisi dan *burn-off-length* terhadap temperatur maksimum metode Simulasi CDFW A6061-ST41 (ket. TK i : Tinggi Kerucut i mm. BOL i : *burn-off-length* i mm)

Dan dari gambar 4.3 dapat kita lihat bahwa semakin tinggi BOL maka semakin tinggi pula temperatur maksimumnya ini disebabkan ketika BOL semakin Panjang, maka *friction time* yang di butuhkan juga semakin lama. Menyebabkan *heat input* yang di terima oleh benda kerja dengan BOL yang tinggi lebih besar dari spesimen dengan BOL lebih rendah.

4.2 Data dan Analisa Pengaruh Tinggi Kerucut dan *Burn-off Length* terhadap Distribusi Temperatur pada Benda Kerja

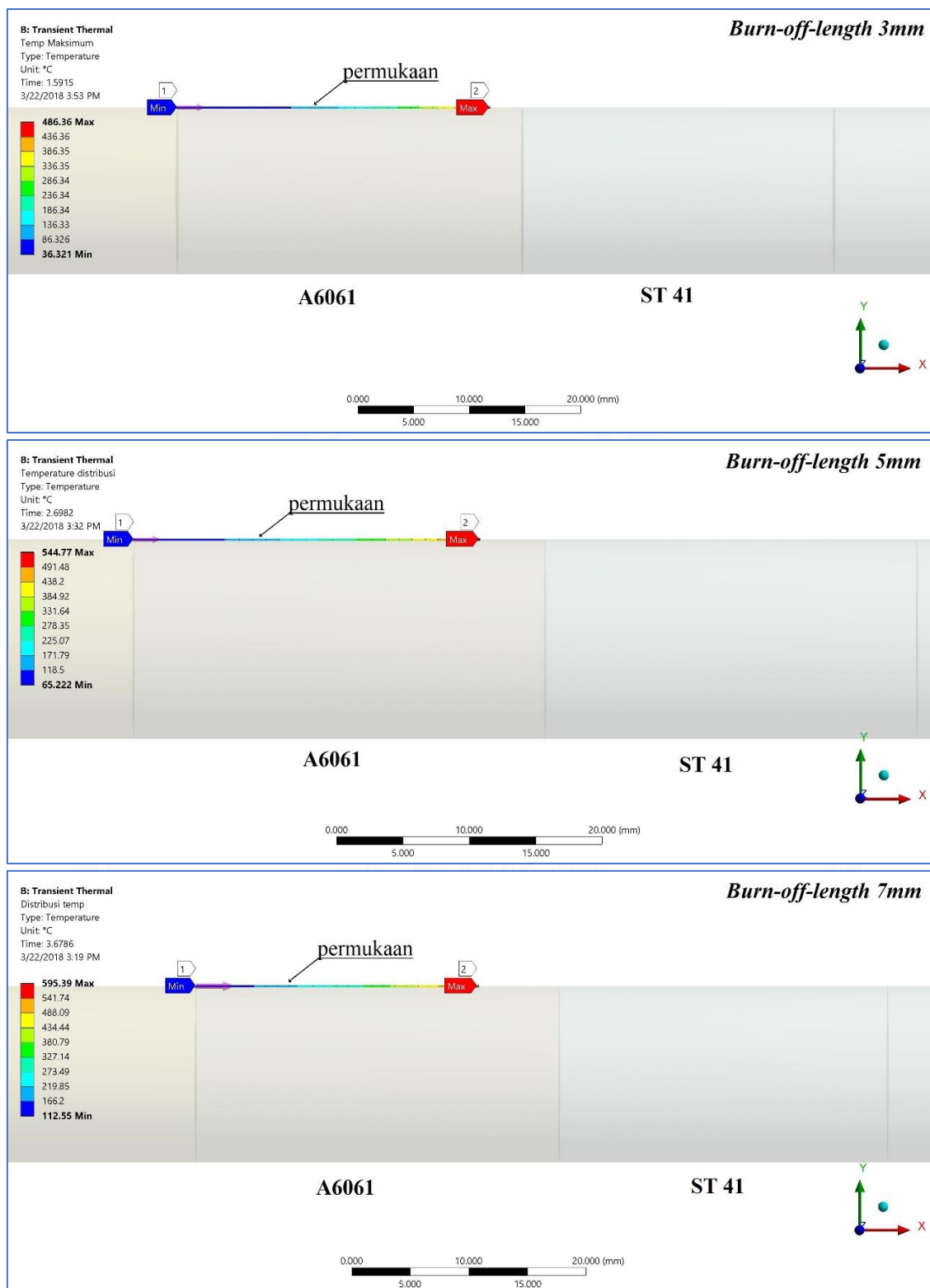
Jika pada metode *metode experiment* hanya dapat mengukur satu titik pada permukaan benda kerja dikarenakan satu *thermo gun* hanya dapat mengukur satu titik di setiap satu pengukuran, maka pada metode simulasi memudahkan untuk mengukur temperatur pada pada tiap bagian dari satu permukaan. Sehingga kita dapat mengetahui

distribusi temperature benda kerja. Pada pengambilan data kali ini sampel yang di ambil dari masing-masing variasi hanya pada bagian Al6061-T6 saja yakni pada bagian yang dapat terdeformasi yaitu sepanjang 31mm. Dengan begitu kita dapat mengetahui pengaruh dari tinggi kerucut dan panjang *burn-off-length* terhadap distribusi temperature dari masing-masing benda kerja.

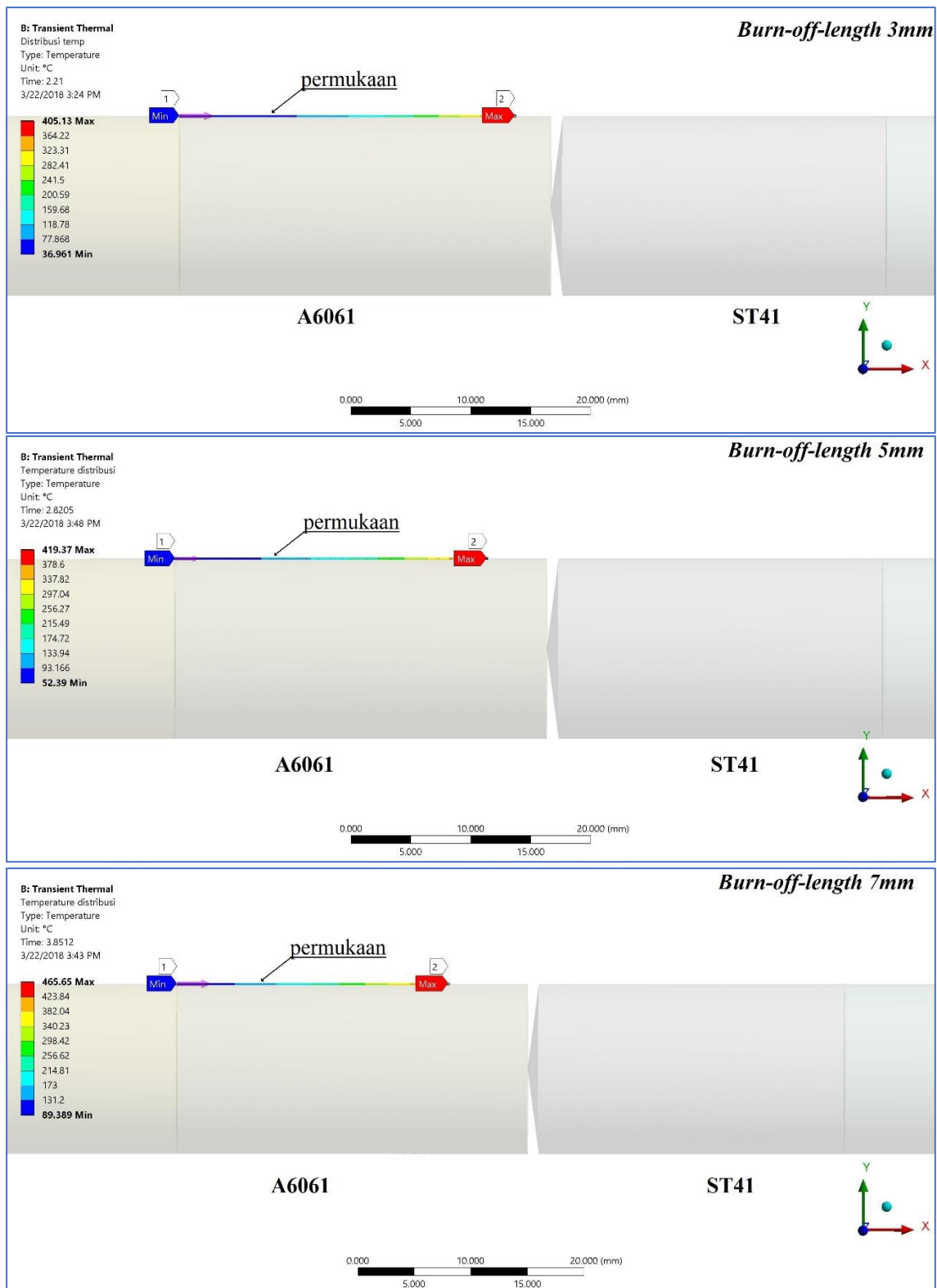
Tabel 4.2

Data Distribusi Temperatur pada permukaan benda kerja (A6061) pada Tinggi Kerucut 0 mm dan Tinggi Kerucut 1mm

length (mm)	Tinggi Kerucut 0			Tinggi Kerucut 1		
	BOL 3	BOL 5	BOL 7	BOL 3	BOL 5	BOL 7
-31	36.321	65.222	112.55	36.961	52.39	89.389
-30	38.506	70.846	121.75	39.044	56.331	96.318
-29	41.092	77.129	131.71	41.471	60.763	103.84
-28	44.138	84.117	142.47	44.289	65.727	111.97
-27	47.711	91.863	154.06	47.548	71.269	120.77
-26	51.88	100.43	166.51	51.301	77.434	130.25
-25	56.721	109.85	179.84	55.606	84.267	140.46
-24	62.313	120.21	194.08	60.523	91.815	151.41
-23	68.735	131.55	209.25	66.11	100.12	163.12
-22	76.074	143.93	225.37	72.435	109.23	175.62
-21	84.414	157.39	242.42	79.559	119.19	188.93
-20	93.841	171.99	260.43	87.547	130.07	203.07
-19	104.44	187.75	279.43	96.464	141.9	218.05
-18	116.31	204.72	299.47	106.37	154.72	233.85
-17	129.54	222.91	320.58	117.35	168.57	250.49
-16	144.22	242.3	342.64	129.45	183.46	267.97
-15	160.41	262.92	365.56	142.74	199.42	286.33
-14	178.19	284.83	389.46	157.29	216.48	305.62
-13	197.59	308.07	414.64	173.11	234.6	325.79
-12	218.67	332.62	441.17	190.26	253.81	346.77
-11	241.4	358.32	469.09	208.75	274.13	368.49
-10	265.81	385.18	498.45	228.6	295.59	391.07
-9	291.97	413.6	529.26	249.78	318.23	414.77
-8	319.93	443.72	561.57	272.3	341.94	439.62
-7	349.55	475.6	595.39	296.23	366.61	465.65
-6	380.59	509.27		321.57	392.28	
-5	413.6	544.77		348.18	419.37	
-4	448.85			375.93		
-3	486.36			405.13		



Gambar 4.4: Distribusi Temperatur (°C) pada permukaan Al-6061 Tinggi Kerucut 0 mm



Gambar 4.5 : Distribusi Temperatur (°C) pada permukaan Al-6061 Tinggi Kerucut 1 mm

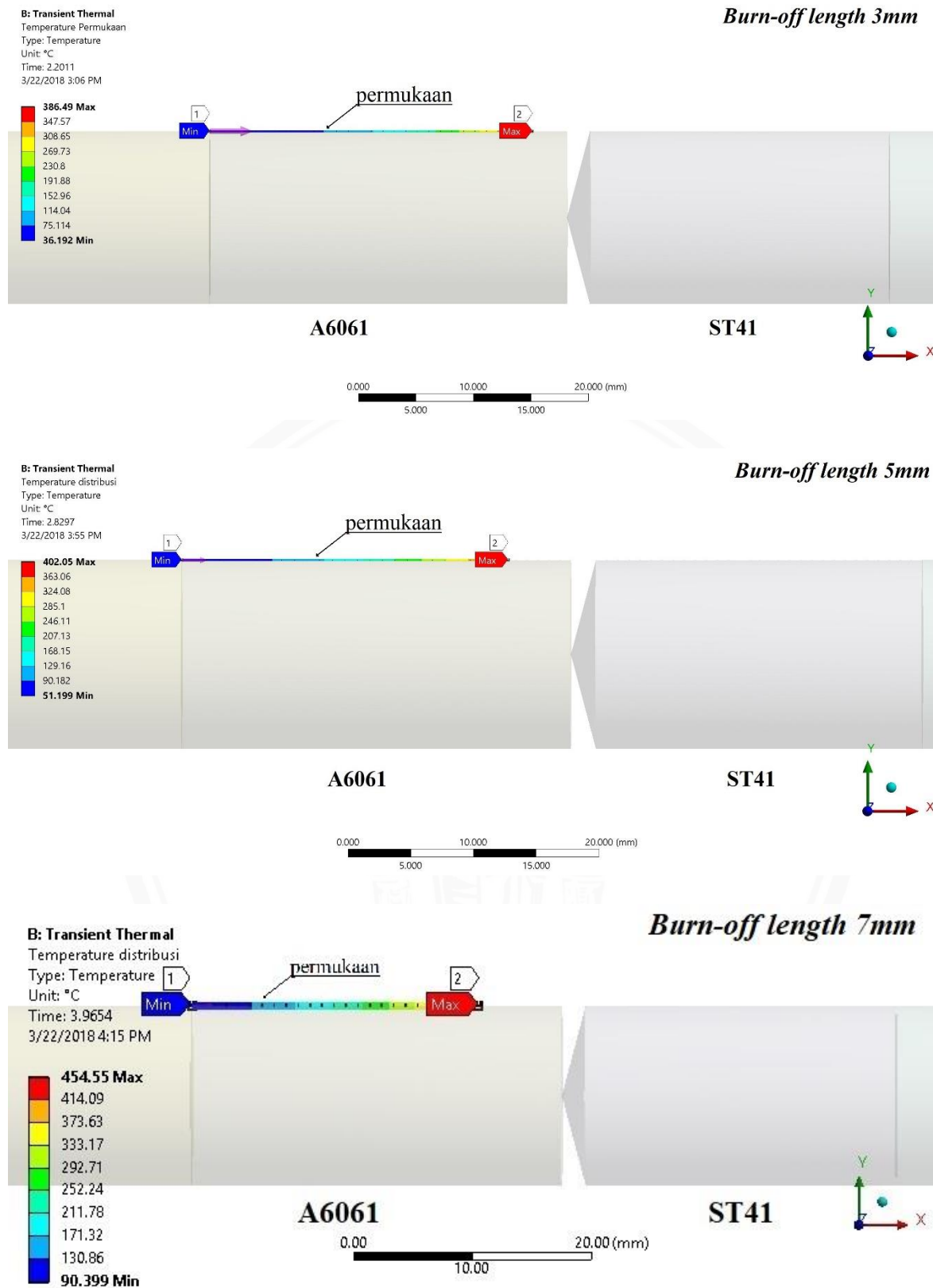
Pada gambar 4.4 dan gambar 4.5 adalah gambar hasil simulasi CDFW pada A6061-ST41 yang menunjukkan distribusi temperatur pada permukaan benda kerja A6061 dengan geometri tinggi kerucut sebesar 0 mm, dan 1mm dengan *burn-off length* sebesar 3 mm, 5

mm, dan 7mm. Dengan temperatur maksimum ditandai dengan warna merah yang kemudian menurun menjauhi permukaan gesek yang di tandai dengan warna oranye, kuning, hijau hingga biru tua.

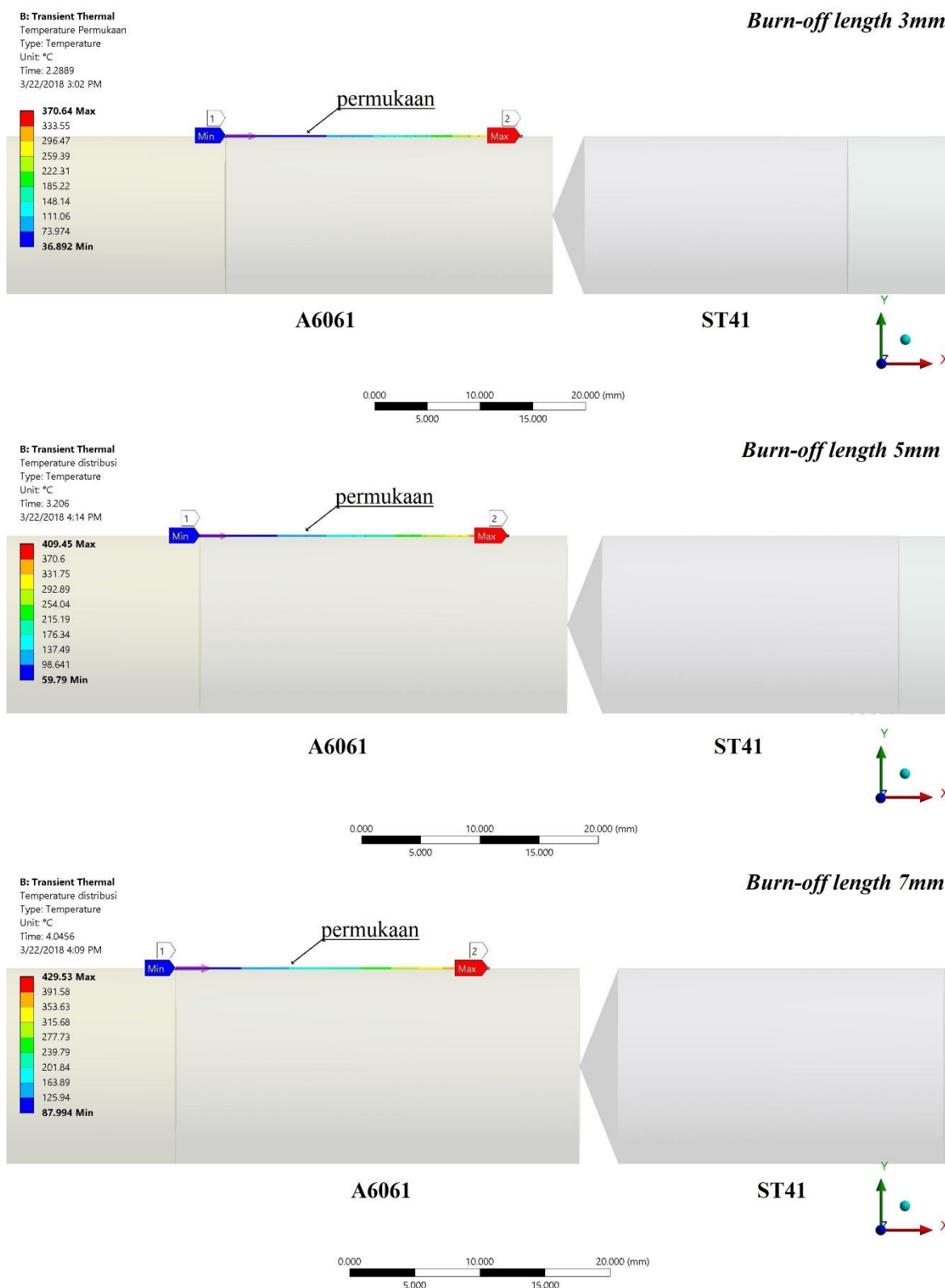
Tabel 4.3

Data Distribusi Temperatur pada permukaan benda kerja (A6061) pada Tinggi Kerucut 2 mm dan Tinggi Kerucut 3mm

Length (mm)	Tinggi Kerucut 2			Tinggi Kerucut 3		
	BOL 3	BOL 5	BOL 7	BOL 3	BOL 5	BOL 7
-31	36.192	51.199	90.399	36.892	59.79	87.994
-30	38.138	54.958	97.26	38.897	64.253	94.498
-29	40.408	59.184	104.69	41.222	69.196	101.53
-28	43.045	63.919	112.71	43.907	74.651	109.12
-27	46.098	69.206	121.36	46.999	80.655	117.29
-26	49.617	75.088	130.67	50.543	87.241	126.08
-25	53.658	81.607	140.67	54.589	94.443	135.5
-24	58.277	88.809	151.38	59.191	102.3	145.59
-23	63.532	96.731	162.82	64.398	110.84	156.35
-22	69.487	105.43	175	70.271	120.11	167.81
-21	76.202	114.93	187.96	76.862	130.15	179.99
-20	83.74	125.31	201.7	84.226	140.98	192.9
-19	92.162	136.6	216.23	92.419	152.64	206.56
-18	101.53	148.83	231.55	101.5	165.15	220.96
-17	111.91	162.05	247.67	111.51	178.54	236.1
-16	123.37	176.28	264.57	122.53	192.81	251.98
-15	135.97	191.53	282.3	134.59	207.97	268.6
-14	149.76	207.83	300.91	147.77	224.05	286.02
-13	164.79	225.18	320.36	162.07	241.01	304.25
-12	181.1	243.58	340.59	177.55	258.87	323.26
-11	198.71	263.02	361.54	194.22	277.64	343
-10	217.63	283.55	383.23	212.1	297.38	363.38
-9	237.86	305.21	405.92	231.19	318.09	384.47
-8	259.37	327.96	429.68	251.45	339.67	406.5
-7	282.22	351.69	454.55	272.91	362.03	429.53
-6	306.44	376.29		295.59	385.18	
-5	331.98	402.05		319.53	413.57	
-4	358.66			344.59		
-3	386.49			370.64		



Gambar 4.6: Distribusi Temperatur (°C) pada permukaan Al-6061 Tinggi Kerucut 2 mm



Gambar 4.7: Distribusi Temperatur (°C) pada permukaan Al-6061 Tinggi Kerucut 3 mm

Pada gambar 4.6 dan gambar 4.7 adalah gambar hasil simulasi CDFW pada A6061-ST41 yang menunjukkan distribusi temperatur pada permukaan benda kerja A6061 dengan geometri tinggi kerucut sebesar 2 mm, dan 3 mm dengan *burn-off length* sebesar 3 mm, 5

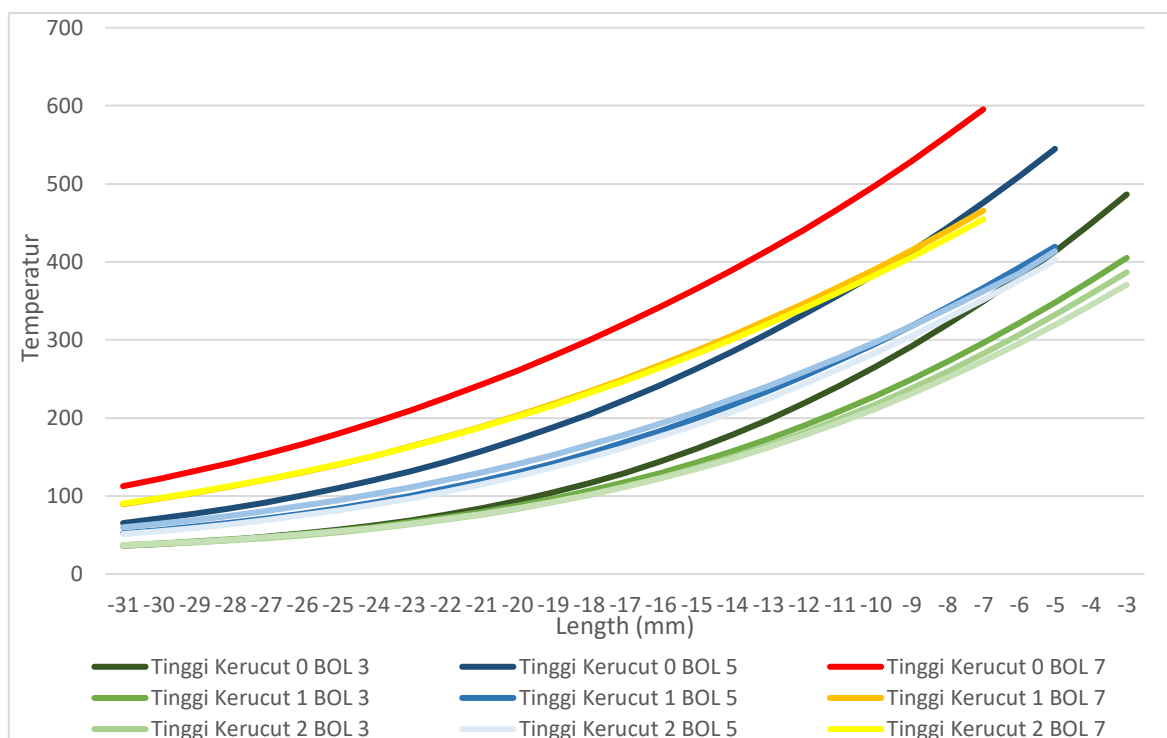
mm, dan 7 mm. Dengan temperatur maksimum ditandai dengan warna merah yang kemudian menurun menjauhi permukaan gesek yang di tandai dengan warna oranye, kuning, hijau hingga biru tua.

Dari data tabel 4.2, tabel 4.3, gambar 4.4, gambar 4.5, gambar 4.6, dan gambar 4.7 di atas dapat kita lihat bahwa untuk semua variasi memiliki daerah gesek yang sama yaitu pada titik 0 mm dan pada masing masing variasi tinggi kerucut untuk *burn-off-length* 3mm, 5mm, 7mm memiliki titik analisa awal berturut-turut -3mm, -5mm, dan -7mm. hal ini dikarenakan waktu analisa pada pengambilan data adalah pada saat *friction time* yaitu pada saat benda kerja mengalami temperatur tertinggi. Dan ketika dalam kondisi tersebut benda kerja mengalami pemendekan sebesar variasi *burn-off-length* yaitu sebanyak 3mm, 5mm, dan 7mm. Dan untuk titik analisa akhir dari semua variasi adalah -31mm yaitu *deformable area* pada penelitian ini

Semakin kecil tinggi kerucut maka luas bidang kontak akan semakin besar sehingga *heat input* yang terjadi akan semakin besar dan mengakibatkan banyak perubahan struktur mikro pada *interface* (daerah kontak saat pengelasan) sehingga nilai kekerasan pada sambungan las menurun. Dheni (2017)

4.2.1 Analisa Pengaruh Tinggi Kerucut dan Burn-off Length terhadap Distribusi Temperatur pada Benda Kerja

Berikut ini adalah grafik yang dihasilkan dari data pada tabel diatas, dengan membandingkan tinggi kerucut dan *burn-off length* terhadap distribusi temperatur.

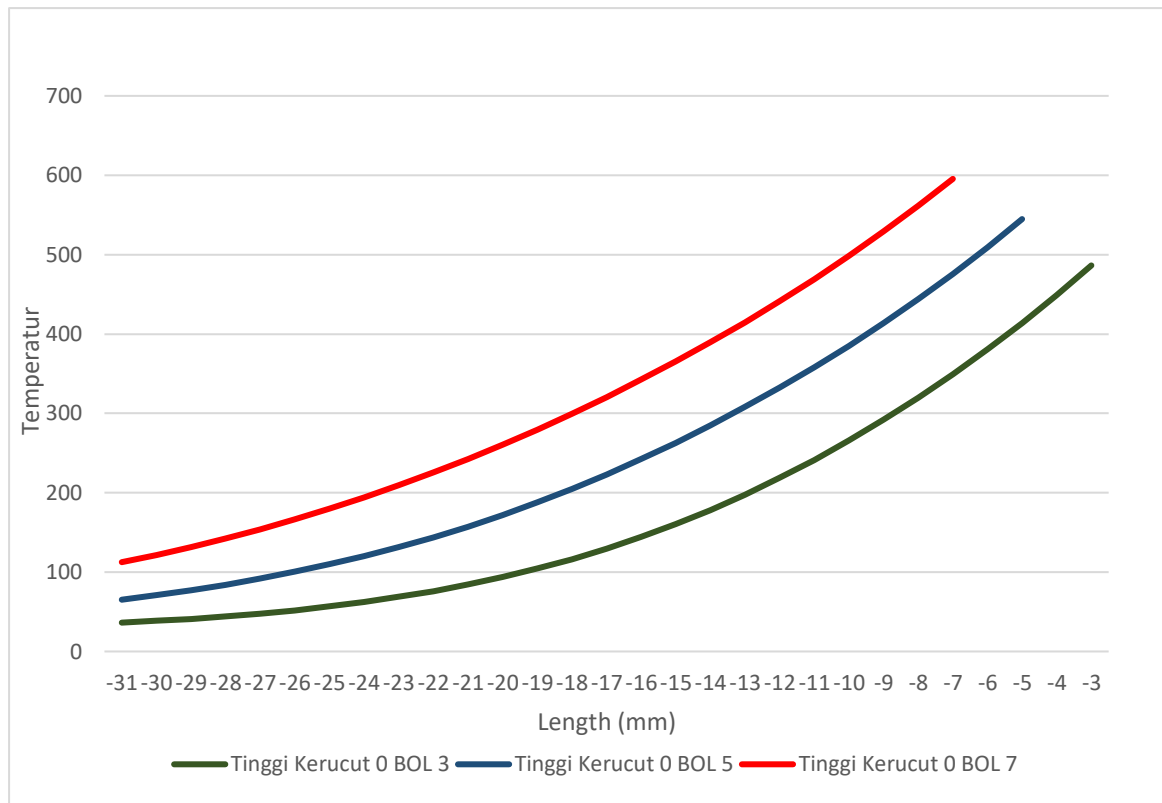


Gambar 4.8: Grafik Pengaruh Tinggi Kerucut dan *Burn-off Length* terhadap distribusi temperatur permukaan A6061 pada simulasi CDFW sambungan A6061-ST41

Gambar 4.8 merupakan grafik yang menunjukkan distribusi temperatur seluruh model variasi. Dari gambar 4.8 grafik menjelaskan bahwa temperature minimum dari setiap benda kerja yang paling rendah adalah temperature minimum milik benda kerja dengan variasi tinggi kerucut 3mm dan BOL 3mm yaitu 36,192°C, dan temperature minimum tertinggi dimiliki oleh benda kerja dengan variasi Tinggi Kerucut 0mm dan BOL 7mm yaitu sebesar 112.55°C.

Dari gambar 4.8 dapat kita lihat pula bahwa semakin rendah tinggi kerucut dan semakin panjang *burn-off-length* maka distribusi temperatur pada masing-masing titik akan semakin tinggi temperaturnya ini akan berdampak pada semakin luasnya daerah HAZ yang dialami masing-masing benda kerja. Untuk mengetahui nilai distribusi temperatur kita bisa melihat pada tabel 4.2 dan tabel 4.3.

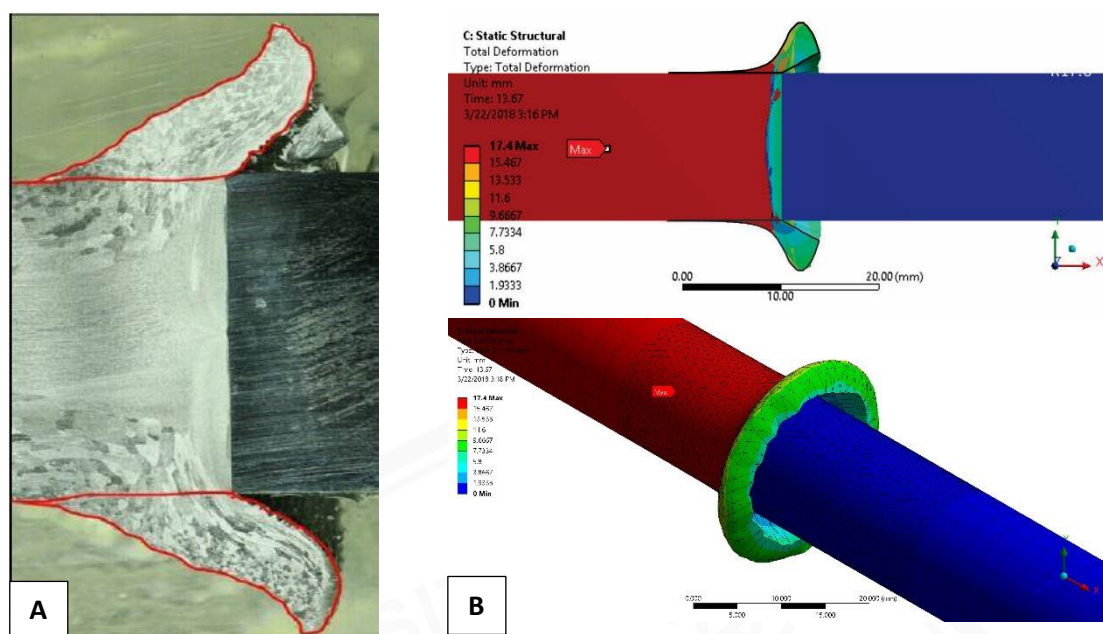
Semakin besar tinggi kerucut maka nilai kekerasan akan semakin rendah sedangkan semakin rendah tinggi kerucut maka nilai kekerasan akan semakin tinggi. Hal ini disebabkan karena semakin kecil tinggi kerucut maka luas bidang kontak akan semakin besar sehingga *heat input* yang terjadi akan semakin besar dan mengakibatkan banyak perubahan struktur mikro pada *interface* (daerah kontak saat pengelasan) sehingga nilai kekerasan pada sambungan las menurun. (dheni dkk 2017)



Gambar 4.9: Grafik distribusi temperatur tertinggi pada Tinggi Kerucut 0mm dengan berbagai variasi *burn-off-length* terhadap distribusi temperature pada permukaan A6061 pada simulasi CDFW sambungan A6061-ST41

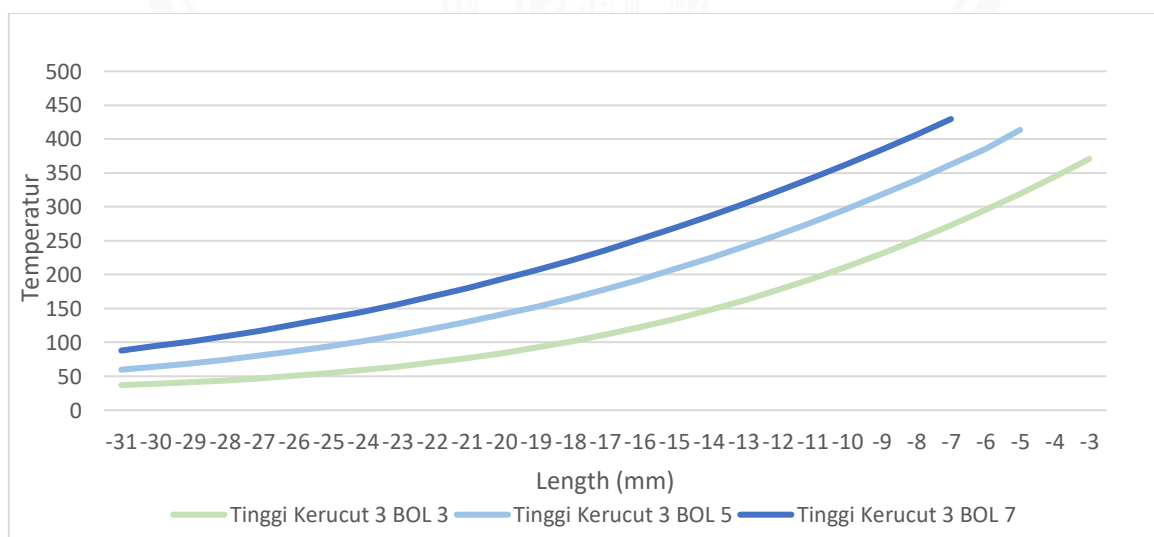
Pada gambar 4.9 memberikan informasi mengenai distribusi temperatur pada model dengan variasi tinggi kerucut 0 mm dan *burn-off length* 3 mm, 5 mm, dan 7 mm. distribusi temperatur pada grafik dihitung dari permukaan gesek. Titik bertemunya kedua material di anggap titik 0 mm. Dari gambar 4.9 dapat kita lihat pula bahwa semakin rendah tinggi kerucut dan semakin panjang *burn-off-length* maka distribusi temperatur pada masing-masing titik akan semakin tinggi temperaturnya ini akan berdampak pada semakin luasnya daerah HAZ yang dialami masing-masing benda kerja. atau dalam hal ini distribusi temperatur, semakin luas, dengan distribusi terbesar pada *burn-off length* 7 mm.

Semakin besar tinggi kerucut menyebabkan nilai kekuatan puntir meningkat, hal ini disebabkan luas bidang kontak pada kedua sisi permukaan spesimen saat proses pengelasan gesek semakin kecil sehingga heat input yang ditimbulkan kecil. Pada *burn-off length*, semakin besar *burn-off length* menyebabkan nilai kekuatan puntir menurun, hal ini disebabkan heat input yang semakin besar pula. (Shandika dkk 2017)



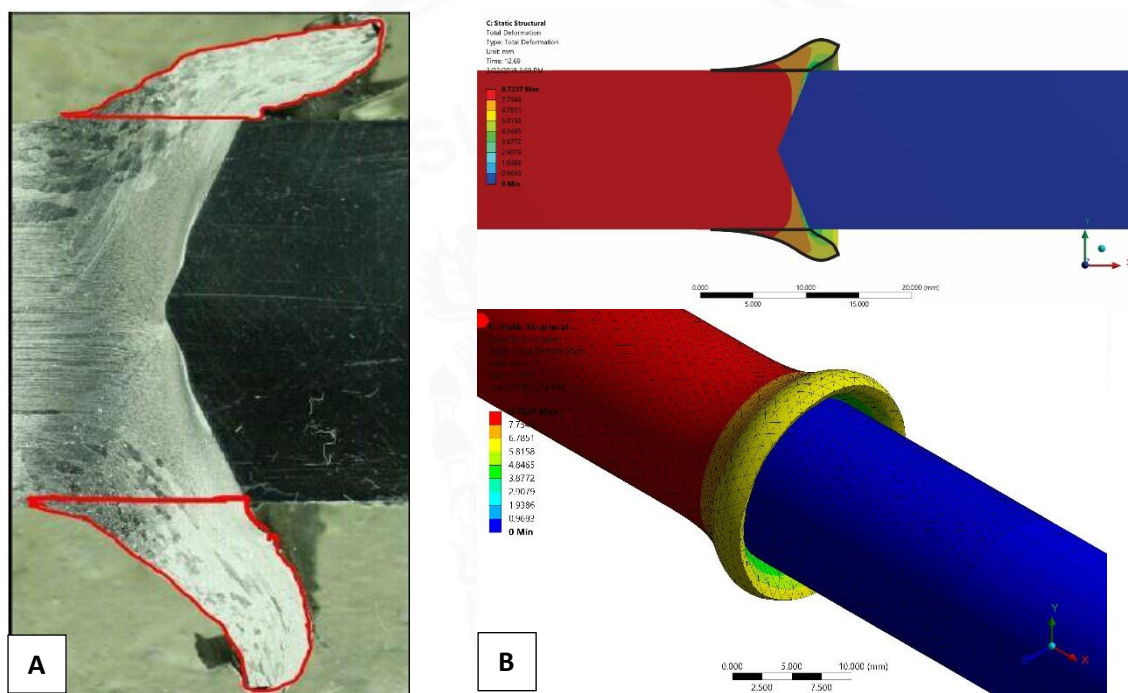
Gambar 4.10 Perbedaan hasil CDFW pada distribusi temperatur tertinggi dengan variasi tinggi kerucut 0mm a) *true experimental* b) metode simulasi

Dari gambar 4.10 dapat dilihat perbedaan total deformasi metode *true experimental* dan metode simulasi dari CDFW A6061-ST41 pada tinggi kerucut 0mm dan *burn-off-length* 7mm. dari gambar 4.10 dapat kita lihat bahwa bentuk *flash* pada kedua metode memiliki hasil yang mendekati sama. Akan tetapi masih ada perbedaan di karenakan pada metode simulasi merupakan kondisi ideal tanpa melihat faktor eksternal.



Gambar 4.11 Grafik distribusi temperatur terendah pada Tinggi Kerucut 3mm dengan berbagai variasi *Burn-off Length* terhadap distribusi temperature pada permukaan A6061 pada simulasi CDFW sambungan A6061-ST41

Pada gambar 4.11 memberikan informasi mengenai distribusi temperatur pada model dengan variasi tinggi kerucut 3 mm dan *burn-off length* 3 mm, 5 mm, dan 7 mm. distribusi temperatur pada grafik dihitung dari permukaan gesek. Titik bertemunya kedua material di anggap titik 0 mm. Dari gambar 4.11 dapat kita lihat pula bahwa semakin rendah tinggi kerucut dan semakin panjang *burn-off-length* maka distribusi temperatur pada masing-masing titik akan semakin tinggi temperaturnya ini akan berdampak pada semakin luasnya daerah HAZ yang dialami masing-masing benda kerja. atau dalam hal ini distribusi temperatur, semakin luas, dengan distribusi terbesar pada *burn-off length* 7 mm.



Gambar 4.12 Perbedaan hasil CDFW A6061-ST41 pada temperatur terendah dengan tinggi kerucut 3mm a) *true experimental* b) metode simulasi

Dari gambar 4.12 dapat dilihat perbedaan total deformasi metode *true experimental* dan metode simulasi dari CDFW A6061-ST41 pada tinggi kerucut 3mm dan *burn-off-length* 3mm. dari gambar 4.12 dapat kita lihat bahwa bentuk *flash* pada kedua metode memiliki hasil yang mendekati sama. Akan tetapi masih ada perbedaan di karenakan pada metode simulasi merupakan kondisi ideal tanpa melihat faktor eksternal lain.

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Pada penelitian ini kita dapat mengetahui bahwa *Software FEM* mampu mensimulasikan distribusi temperatur dan temperatur maksimum pada pengelasan CDFW.

1. Semakin besar tinggi kerucut maka temperatur maksimum yang didapat akan semakin rendah dan distribusi temperatur pada suhu tinggi akan semakin sempit dikarenakan saat awal proses pengelasan luas permukaan benda yang bergesekan sempit dan meluas yang menyebabkan total *heat input* menjadi lebih kecil
2. Semakin besar *burn-off length*, maka temperatur maksimum akan semakin tinggi dan distribusi temperatur akan semakin luas dikarenakan semakin besar *burn-off length* maka waktu yang di butuhkan pada saat pengelasan atau disebut juga *friction time* akan semakin lama yang mengakibatkan total *heat input* menjadi lebih besar

5.2 Saran

1. Simulasi pengelasan CDFW lebih dikembangkan untuk mengurangi kesalahan dan biaya dari metode *true experimental*.
2. Hasil penelitian bisa digunakan untuk penelitian lebih lanjut mengenai pengelasan CDFW.

DAFTAR PUSTAKA

- Adam, Conrad (1926). *Friction welding for any application*. South Bend, Indiana: MTI's.
<http://www.mtiwelding.com/>. (diakses 7 Desember 2017)
- Akin, John Edward (2010). *Finite Element Analysis Concepts Via Solidworks*. Singapura: World Scientific Publishing Co. Ptc. Ltd.
- Alves, Eder Paduan , Neto, Francisco Piorino, An, Chen Ying, da Silva, Euclides Castorino (2012). *Experimental Determination of Temperature During Rotary Friction Welding of AA1050 Aluminum with AISI 304 Stainless Steel*
- American Welding Society (2009). *Standard Welding Terms and Definitions*. Miami: American National Standard Institute.
- ASM Aerospace Specification Metals, Inc. *Aluminum 6061-T6*. Florida.
<http://asm.matweb.com/> (diakses pada 10 Desember 2017)
- Bhamji, Imran, Preuss, Michael, Threadgill, Phillip L., & Addison, Adrian C. (2011). *Solid State Joining of Metals by Linear Friction Welding: A Literature Review*. 27 (1): 2-12
- Can, Ahmet, Sahin, Mumin, & Kucuk, Mahmut. 2010. *Modelling of Friction Welding*. International Scientific Conference. II: 135-142.
- Cengel, Yunus A. (2002). *Heat Transfer A Practical Approach*. USA: Mcgraw-Hill.
- Dheni, Francius, Irawan, Yudy Surya, Imawan, Bustanul, Oerbandono, Tjuk dan Istiarto (2017). *Thesis of Effect of Dimension One Side Cone And Burn-off Length Toward Hardness Distribution And Microstructure Friction Weld Joint (A6061-St 41)*.
- Imadudin, Muhamad, Irawan, Yudy Surya, Choiron, Moch. Agus (2017). *Thesis of Simulation The Effect of Cone Height and Burn-off Length Againts Temperature Distribution CDFW joint A6061*.
- Khan, Ishtiaq Ahmed (2011) *Journal of Experimental and Numerical Investigation on the Friction Welding Process*. India: Jawaharlal Nehru Technology University Hyderabad.
- Kissel, J. Randolph dan Ferry, L. Robert (2002). *Journal of Aluminum Structures, A Guide to Their Specifications and Design*. New York: John Wiley and Sons Inc.
- Lin, C.B., Mu, C.K., Wu, W.W., dan Hung, C.H. (1999). *Journal of The Effect of Joint Design and Volume Fraction on Friction Welding Properties of A360/SiC (p) Composites*. Taiwan: Tam Kang University.
- Srija, V. dan Reddy, A. Chennakesava. (2013). *Finite Element Analysis of Friction Welding Process for 2024Al Alloy and UNS C23000 Brass*. International Journal of Science and Research. 4: 1685-1690



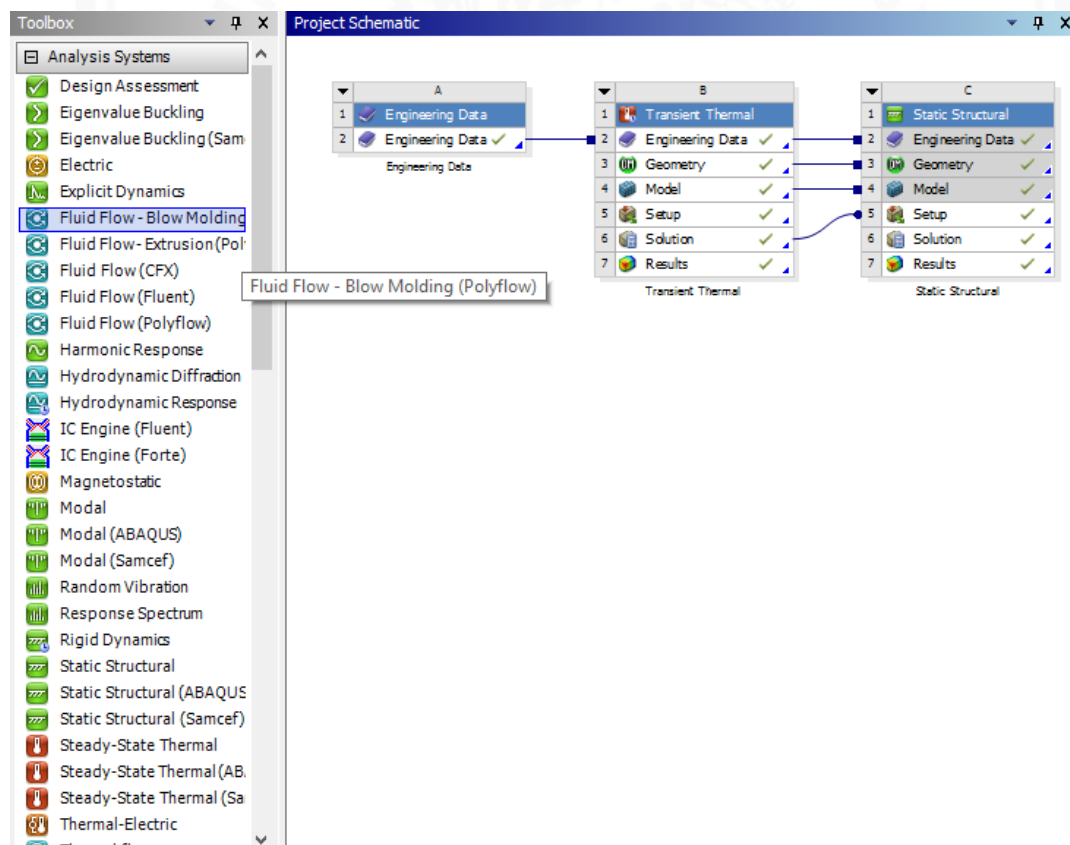
LAMPIRAN

Lampiran 1 : Langkah-langkah Pemodelan Simulasi (Variasi Tinggi Kerucut 3mm dan *burn-off length* 7mm)

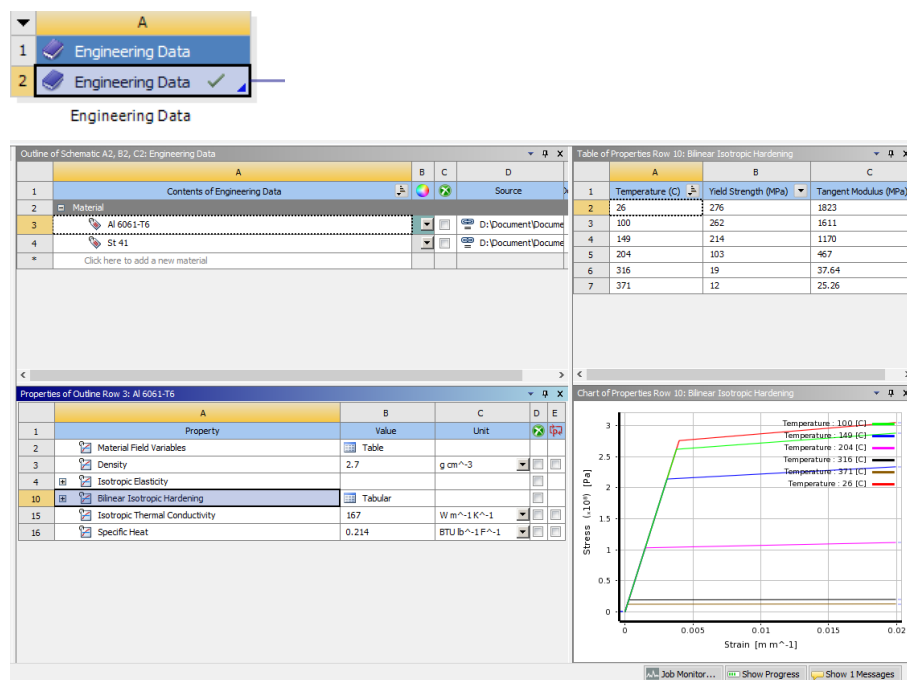
1. Membuka Ansys Workbench 17.0



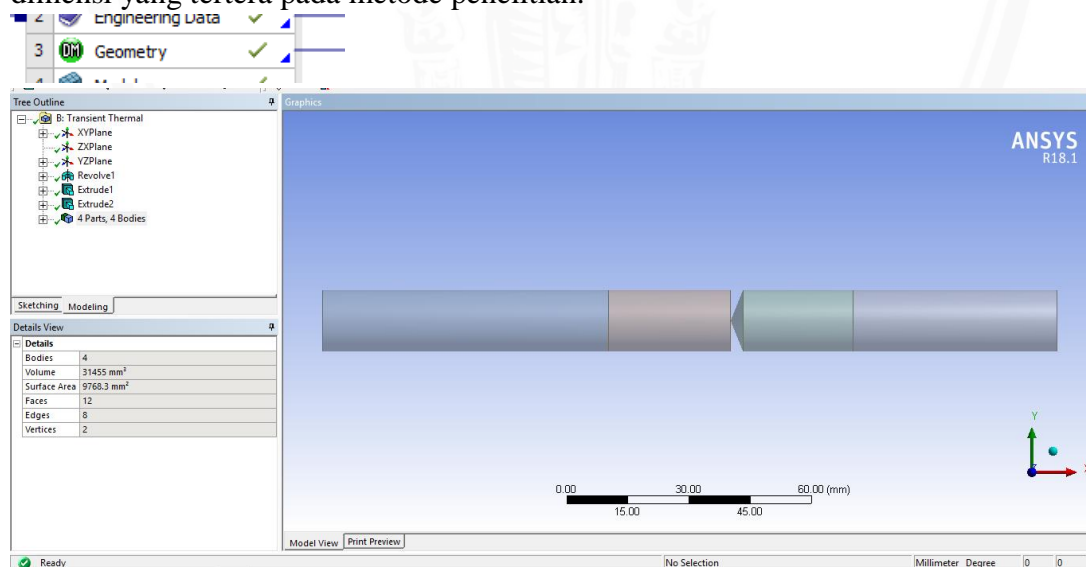
2. Memilih *Transient Thermal* kemudian di *couple static structural*



- Klik kiri 2 kali *Engineering Data*, lalu masukkan data material A6061 dan St41, Jika sudah selesai, klik *Return to Project*.

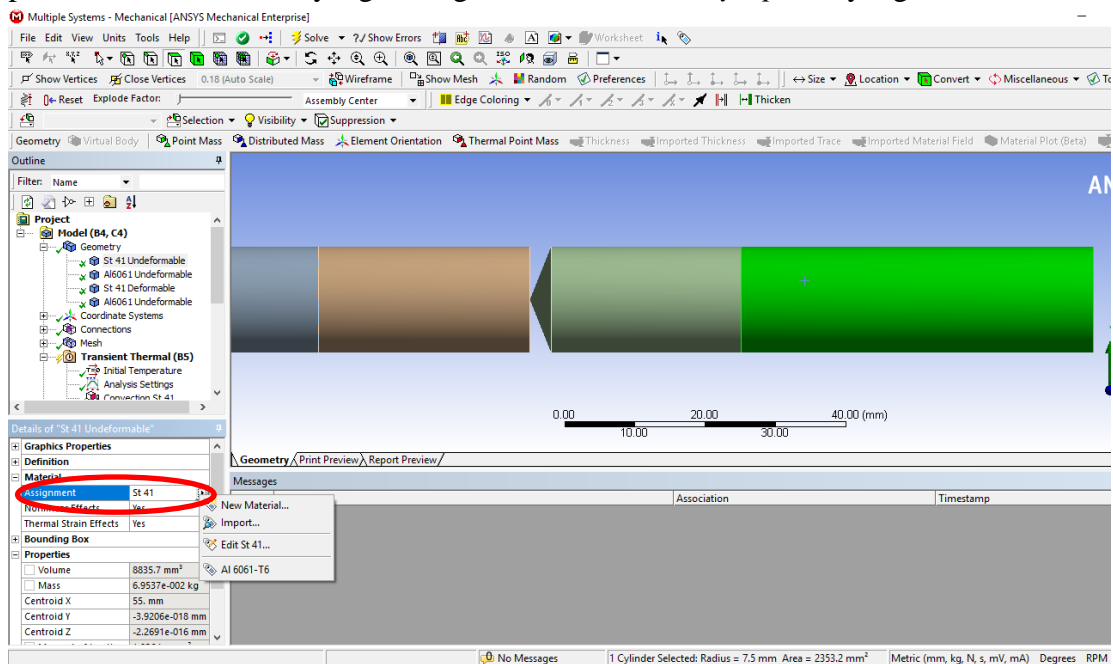


- Klik kiri 2 kali *Geometry*, lalu gambarlah benda kerja A6061 dengan menggunakan dimensi yang tertera pada metode penelitian.

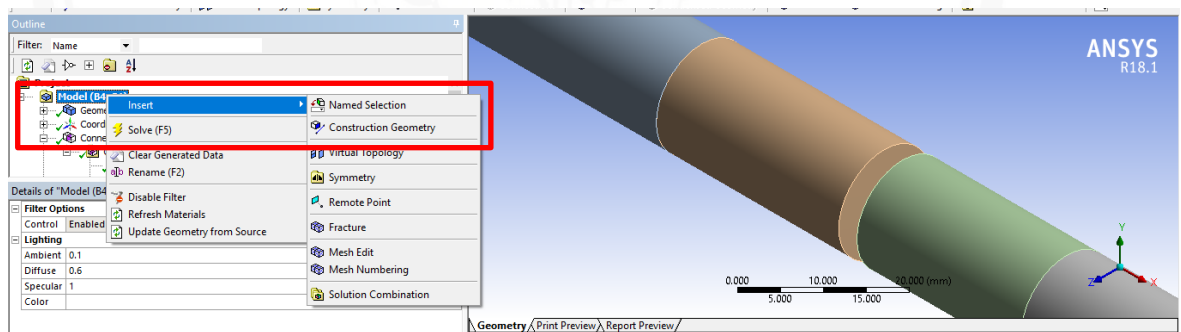


- Apabila proses *Geometry* selesai, kembali ke *project schematics*, lalu klik kiri 2 kali pada *Model*.

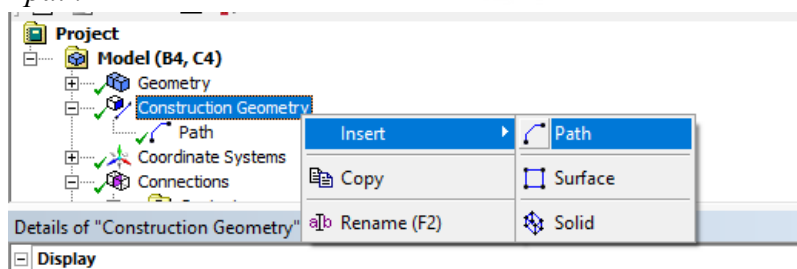
6. *Modelling Geometry* untuk Memasukkan material data dengan cara klik *assignment* lalu pilih material data yang diinginkan untuk *body part* yang di kehendaki



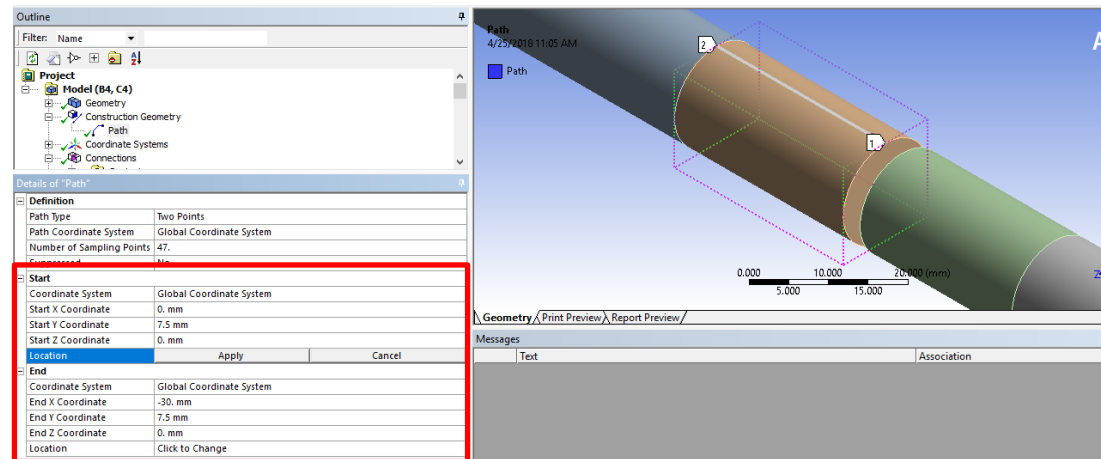
7. Dikarenakan *sample* temperatur yang akan di ambil adalah pada permukaan Al6061 yang terdeformasi maka dibutuhkan "*construction geometry*" berupa "*path*" Dari titik 1 (0,7.5,0) hingga titik 2 (-30,7.5,0). Pertama klik kanan pada "*model*" lalu pilih "*insert*" kemudian pilih "*construction geometry*"



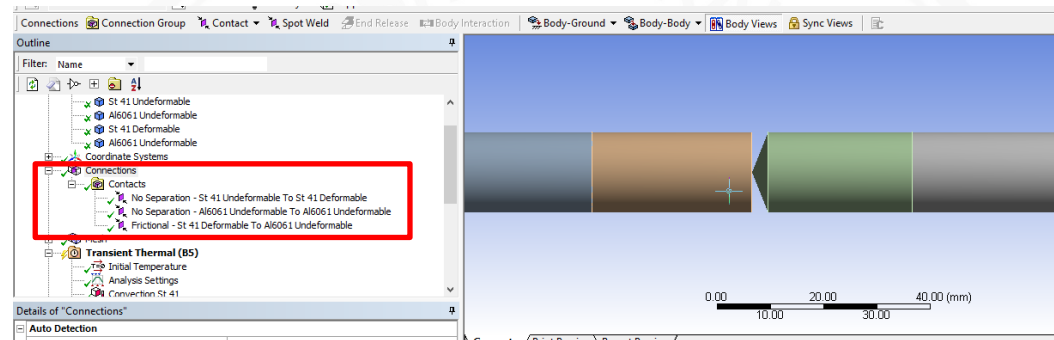
Kemudian klik kanan pada "*construction geometry*" lalu pilih "*insert*" kemudian pilih "*path*"



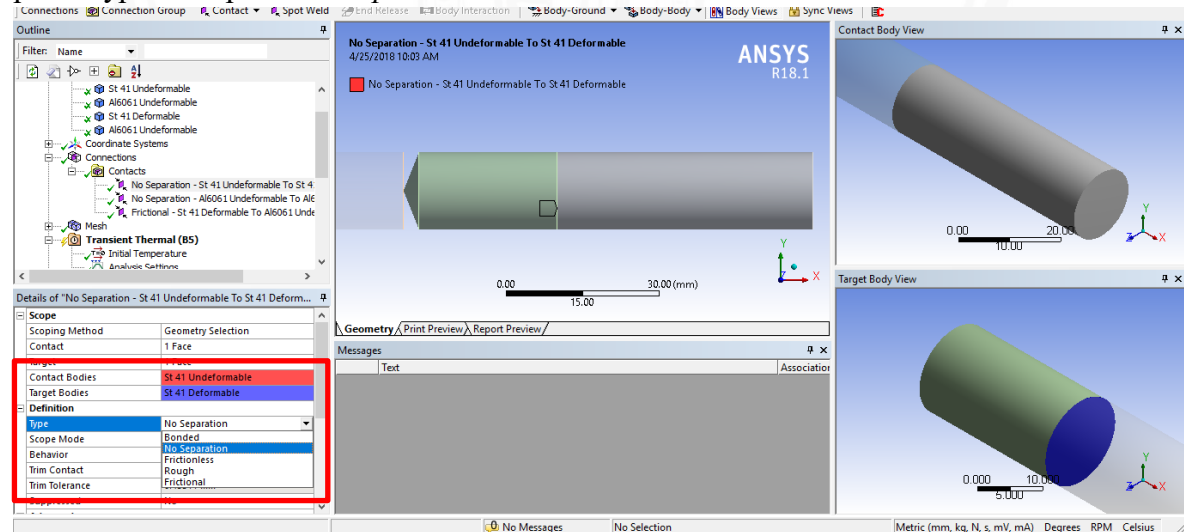
Lalu atur posisi titik 1 (0,7.5,0) dan titik 2 (-30,7.5,0) seperti pada gambar dan kemudian akan terlihat hasil dari *path* yang kita gambar.



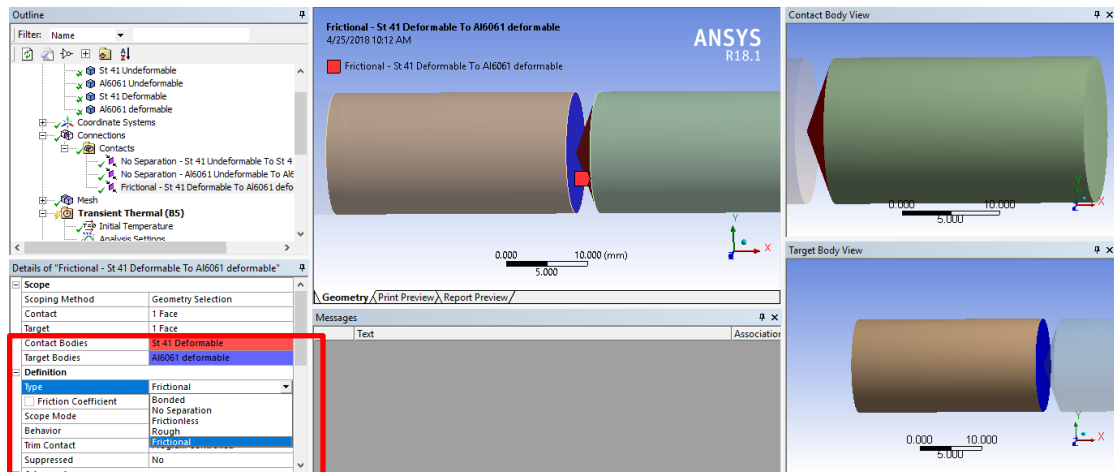
8. Mengatur *connection contact* “no separation” dan “frictional”, dengan koefisien gesek sebesar 0,47.



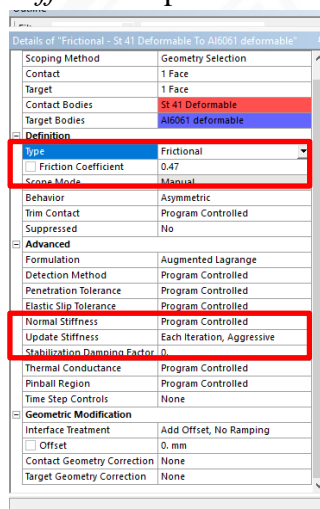
Untuk *no separation contact* pilih “*contact body* dan *target body*” yang diinginkan lalu pilih “*type*” dan pilih “*no separation*”



Untuk *frictional contact* pilih “*contact body* dan *target body*” yang diinginkan lalu pilih “*type*” dan pilih “*frictional*”

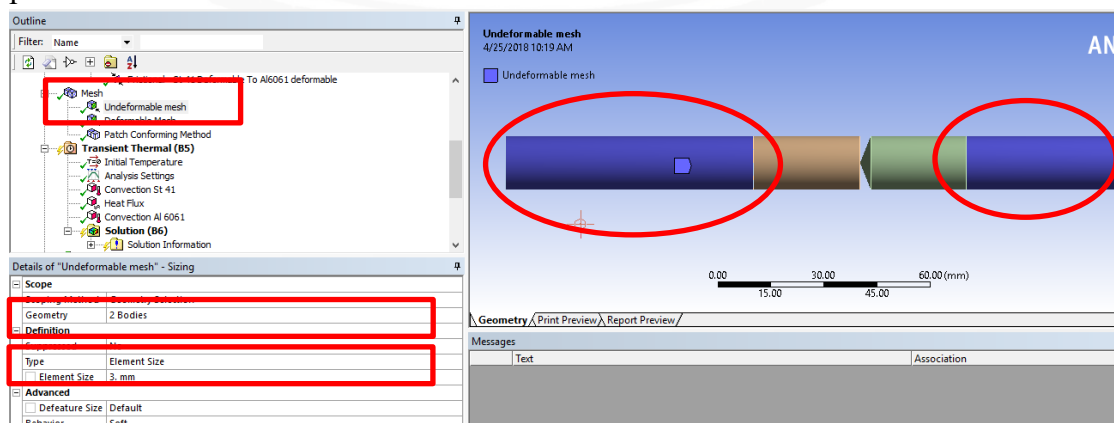


Pada pengaturan *frictional contact*, “*friction coefficient*” di atur 0.47 dan “*update stiffness*” dipilih “*each iteration, Aggressive*”

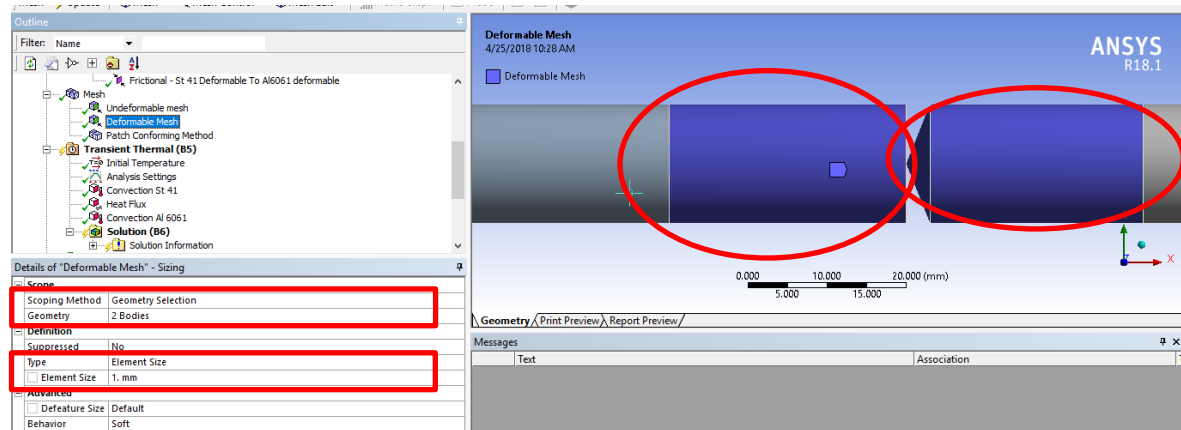


9. Mengatur Mesh

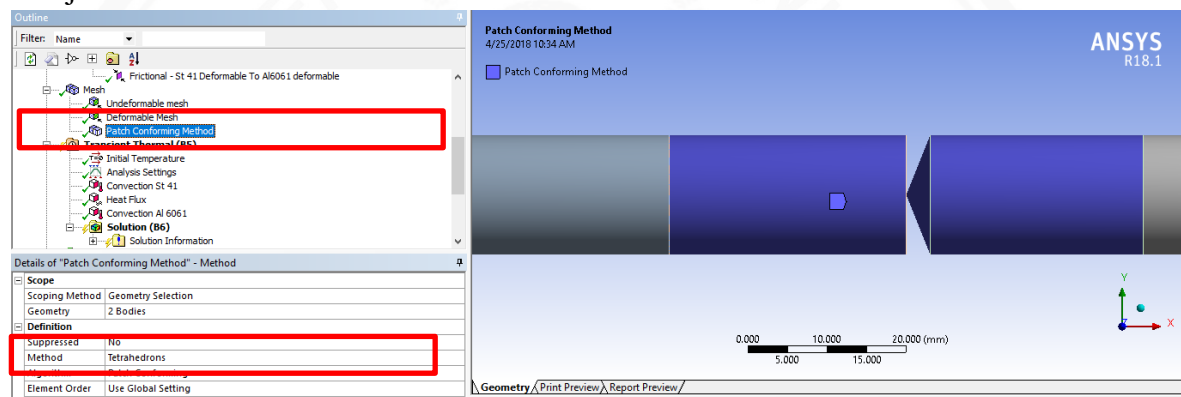
Untuk *undeformable bodies* pilih “*body sizing*” lalu ukuran mesh diatur sebesar 3mm pada “*element size*”



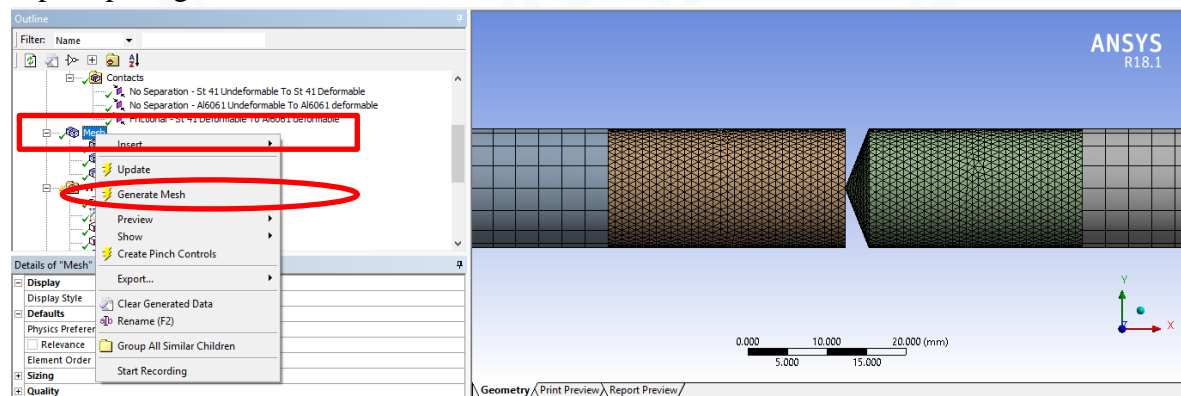
Kemudian untuk *bodies part* yang terdeformasi (*deformable body*) pilih “*body sizing*” kemudian ukuran mesh diatur sebesar 1mm pada “*element size*”



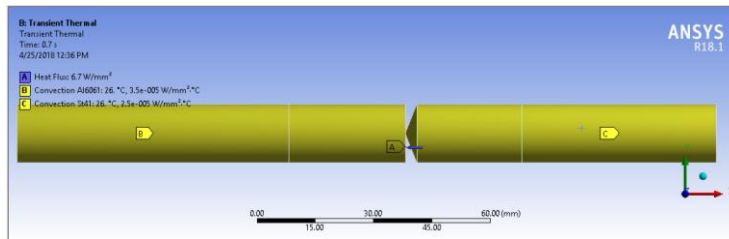
Untuk kualitas hasil yang lebih akurat *mesh* pada *body* yang terdeformasi dirubah metode *meshingnya* menggunakan “*patch conforming method*” dan dirubah metodenya menjadi “*tetrahedrons*”



Jika sudah klik kanan pada “*mesh*” lalu pilih “*generate mesh*” lalu akan muncul hasil seperti pada gambar dibawah.

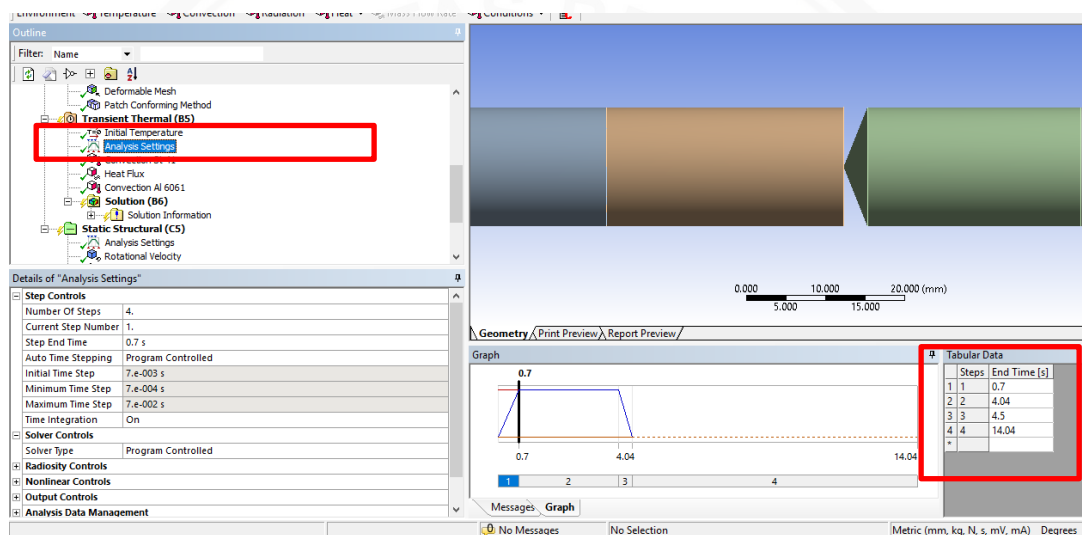


10. Transient thermal analysis

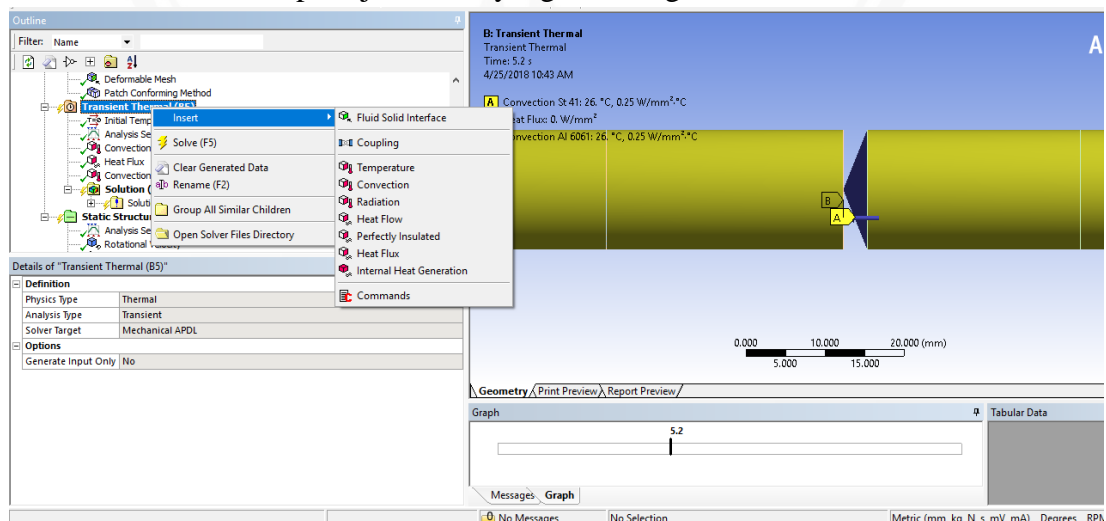


Mengatur Boundary Condition transient thermal

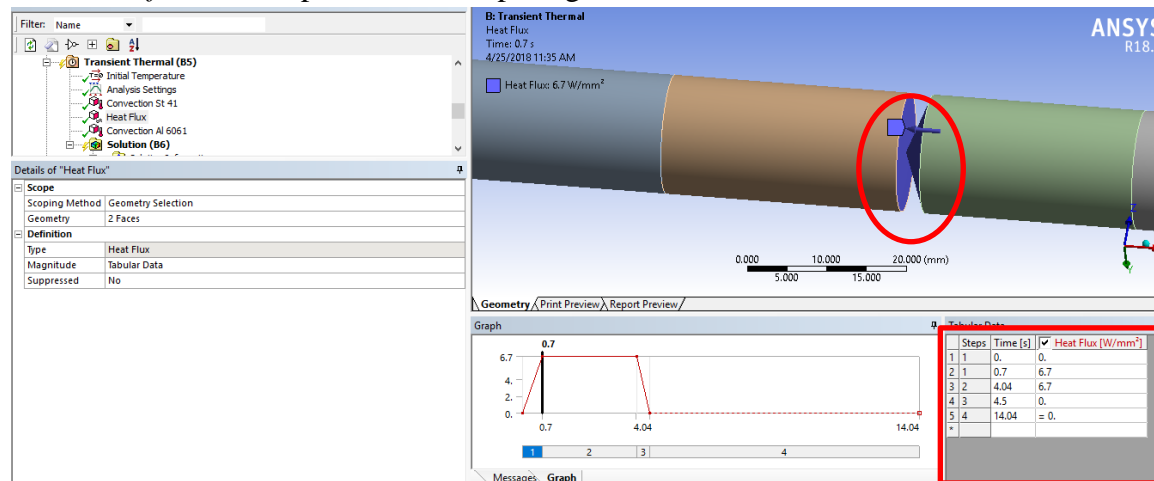
Pertama yang harus dilakukan untuk mengatur *Boundary Condition* pada *transient thermal* ialah mengatur “*analysis setting*”. untuk model tinggi kerucut 3mm dan *burn-off length* 7mm memiliki *friction time* selama 4.04 detik dan *upset force* selama 10 detik. Kemudian jenis *load* yang digunakan ialah *load* “*heat flux* dan *Convection*” sehingga “*analysis setting*” untuk model ini ialah sebagai berikut :



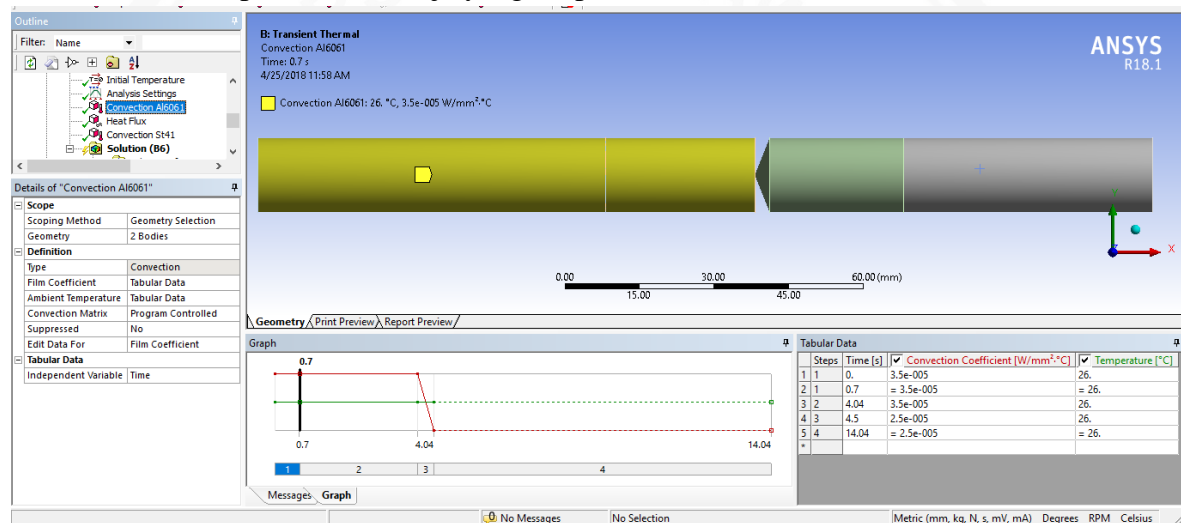
Untuk mengatur jenis *load* yang digunakan dengan cara klik kanan pada “*transient thermal*” → *insert* → pilih jenis *load* yang akan di gunakan.



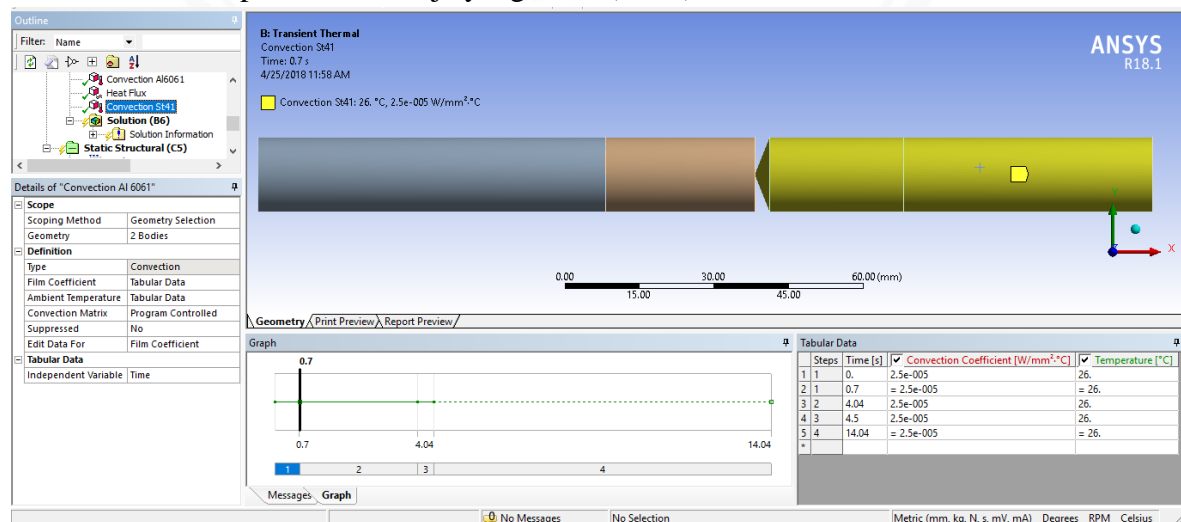
Load “heat flux” pada model variasi ini memiliki nilai $6,7 \text{ W/mm}^2$ pertama pilih bagian yang terjadi *heat flux* yaitu pada permukaan benda yang bergesekan. Kemudian atur besar *heat flux* terhadap waktu sesuai pada gambar.



Load Convection pada benda kerja yang berputar (Al 6061)



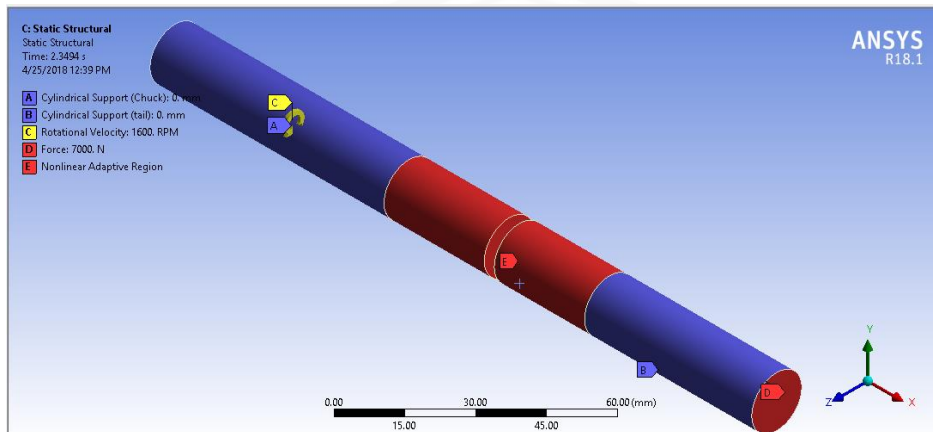
Load Convection pada benda kerja yang diam (St 41)



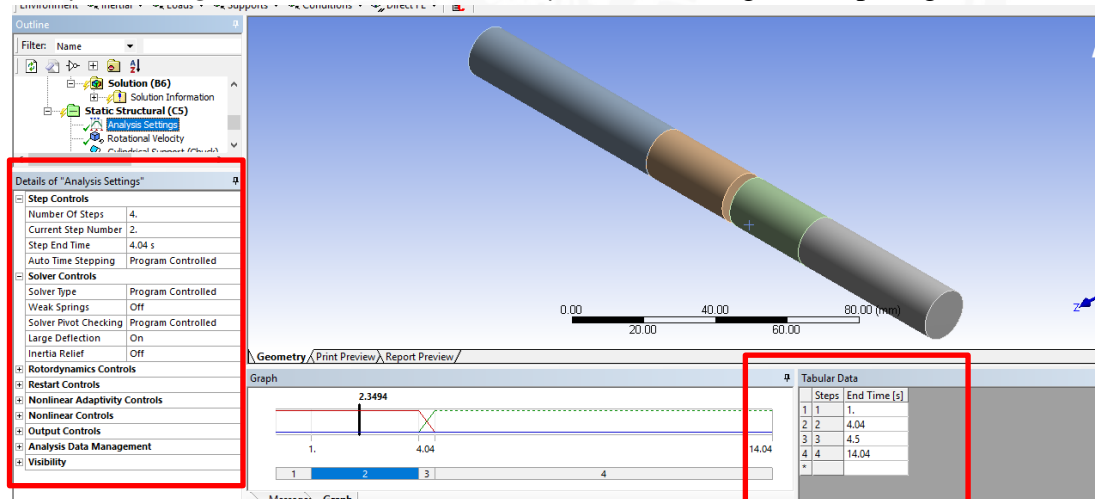
11. Static structural analysis

Boundary Condition pada *static structural analysis* yaitu :

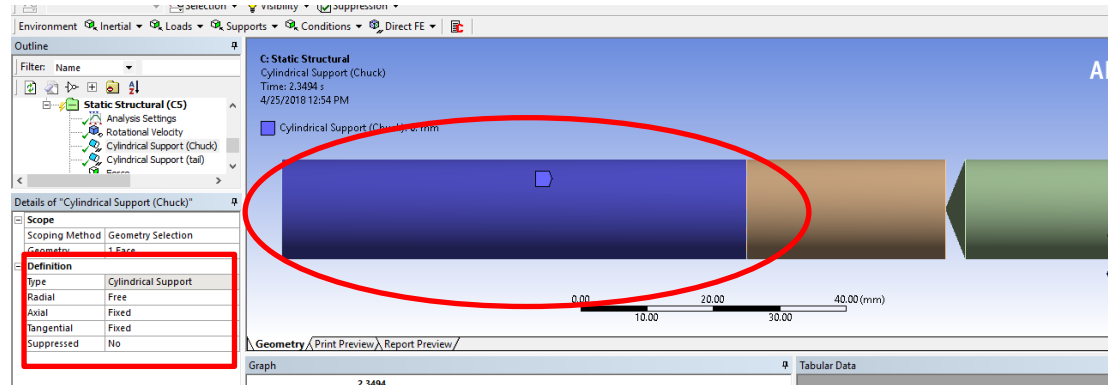
- *Cylindrical Support free radial* untuk *chuck*
- *Cylindrical Support free axial* untuk *tail*
- *Friction force* sebesar 7000 N selama 4,04 detik
- *Upset force* sebesar 17500 N selama 10 detik
- *Rotational velocity* 1600 rpm
- *Nonlinear adaptive region* pada bagian yang terdeformasi



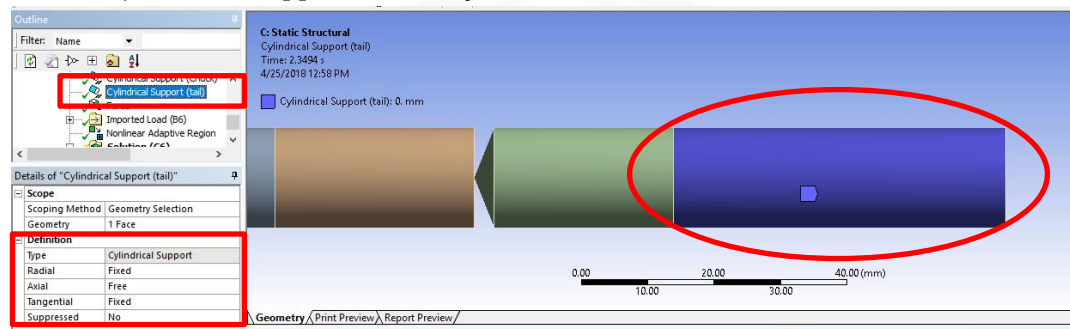
Analysis setting Pada *static structural analysis* diatur sebagaimana pada gambar berikut:



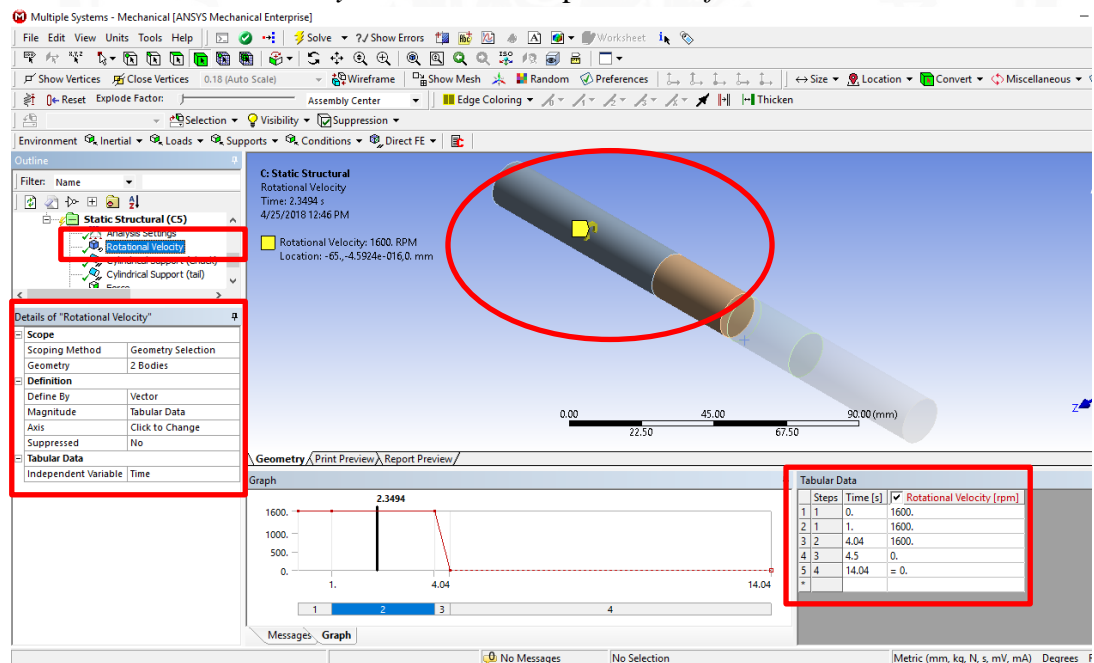
Load "Cylindrical support" (chuck) "free radial"



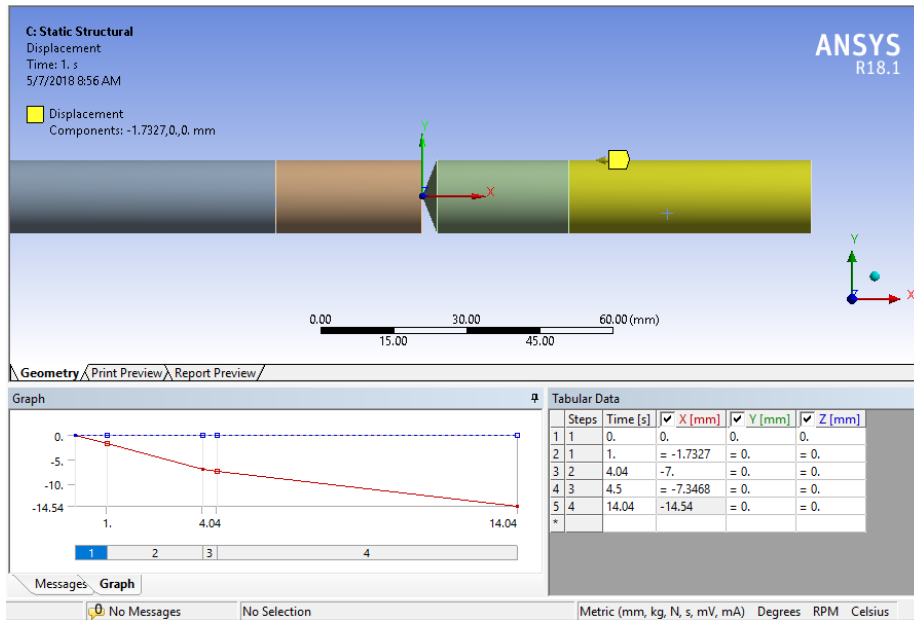
Load "Cylindrical support" (tail) "free axial"



Load "Rotational Velocity" sebesar 1600 rpm selama friction time

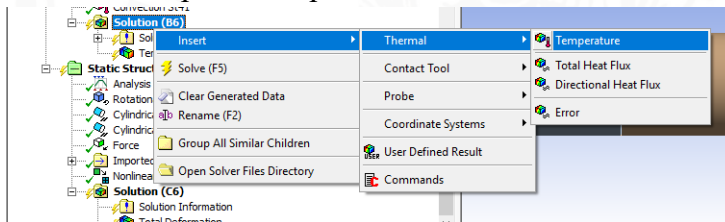


Substitusi Force kedalam Displacement Load

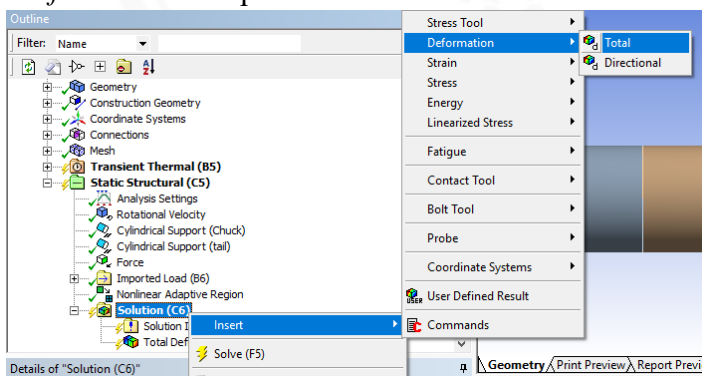


12. Solution

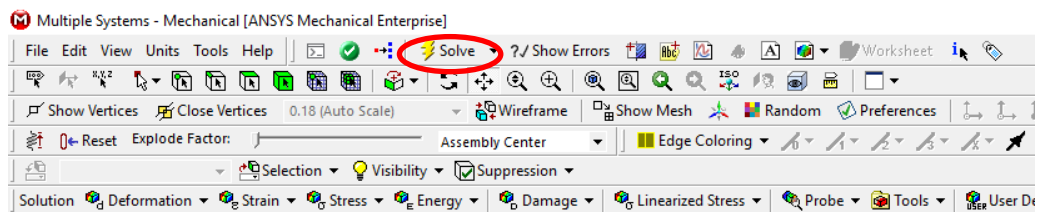
Pada *transient thermal analysis* “solver output” diatur agar *output* yang di hasilkan berupa “*body temperature*” yaitu dengan cara : klik kanan pada “*solution*” → “*insert*” → “*thermal*” → pilih “*temperature*”



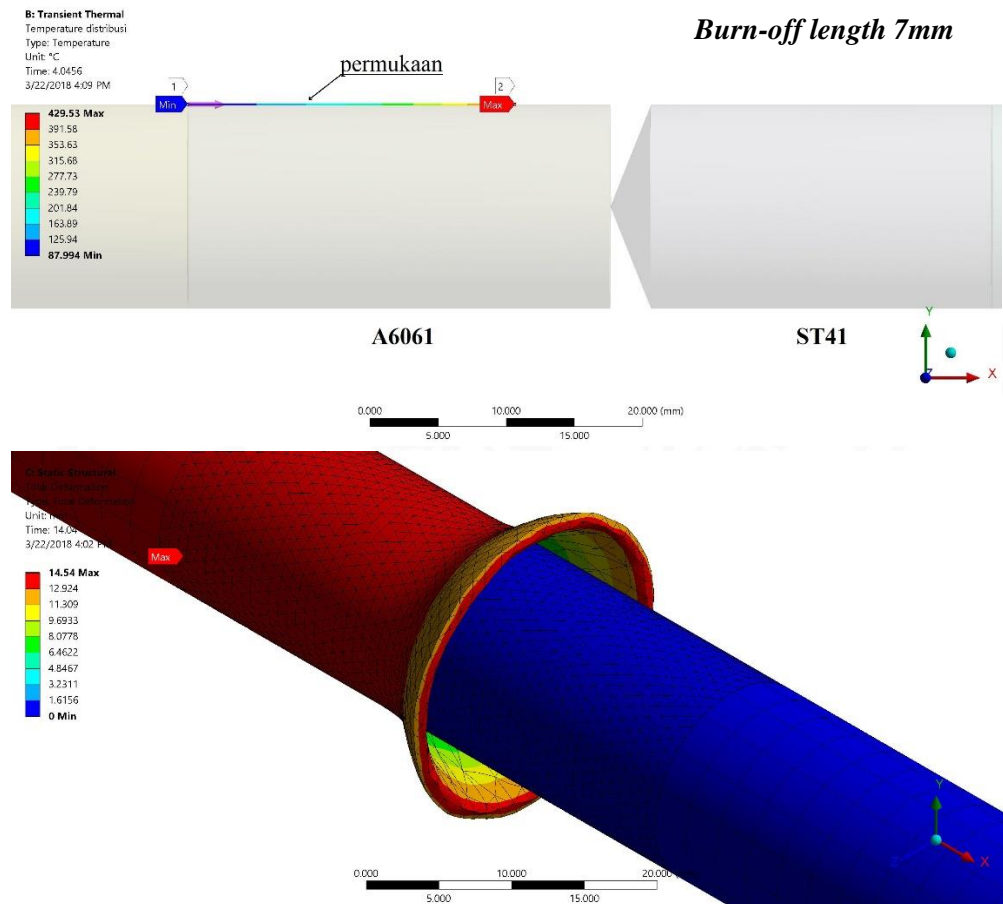
Kemudian untuk *static structural analysis* “solver output” diatur agar menghasilkan total deformasi yaitu dengan cara : klik kanan pada “*solution*” → “*insert*” → “*deformation*” → pilih “*total*”



13. *Solving* untuk proses *solving* klik “*solve*” pada menu di *toolbar* atau bisa juga dengan menekan tombol “*f5*”

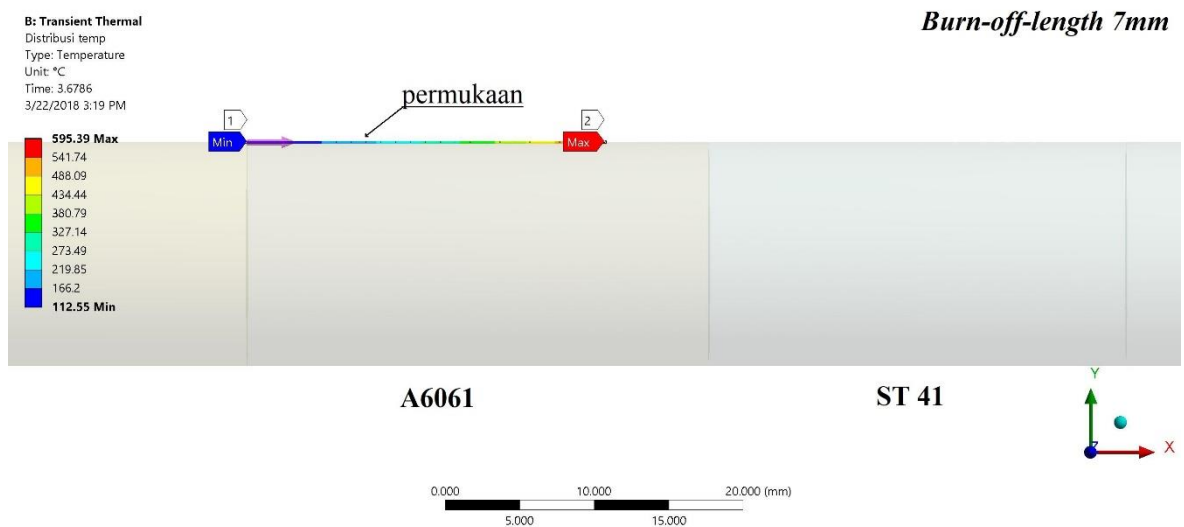
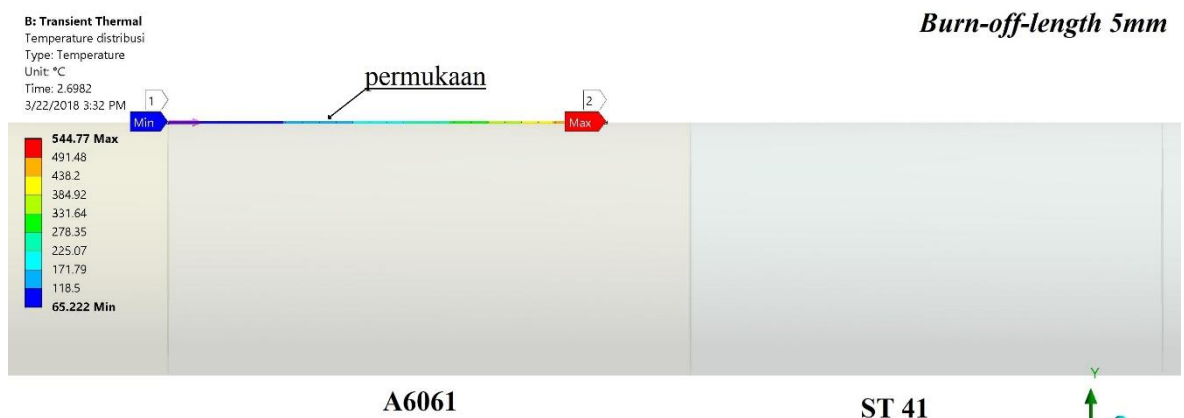
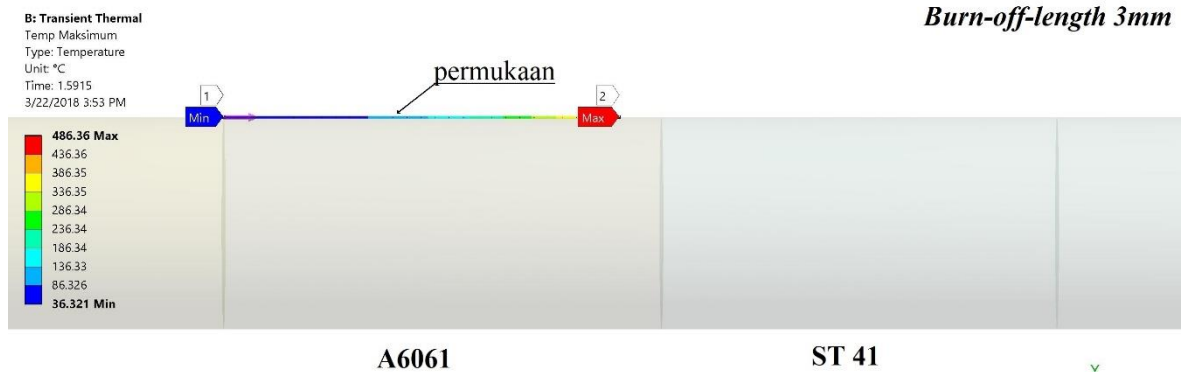


14. Proses *solving* membutuhkan waktu ± 48 jam, berikut merupakan hasil berturut-turut dari *transient thermal analysis* dan *static structural analysis*

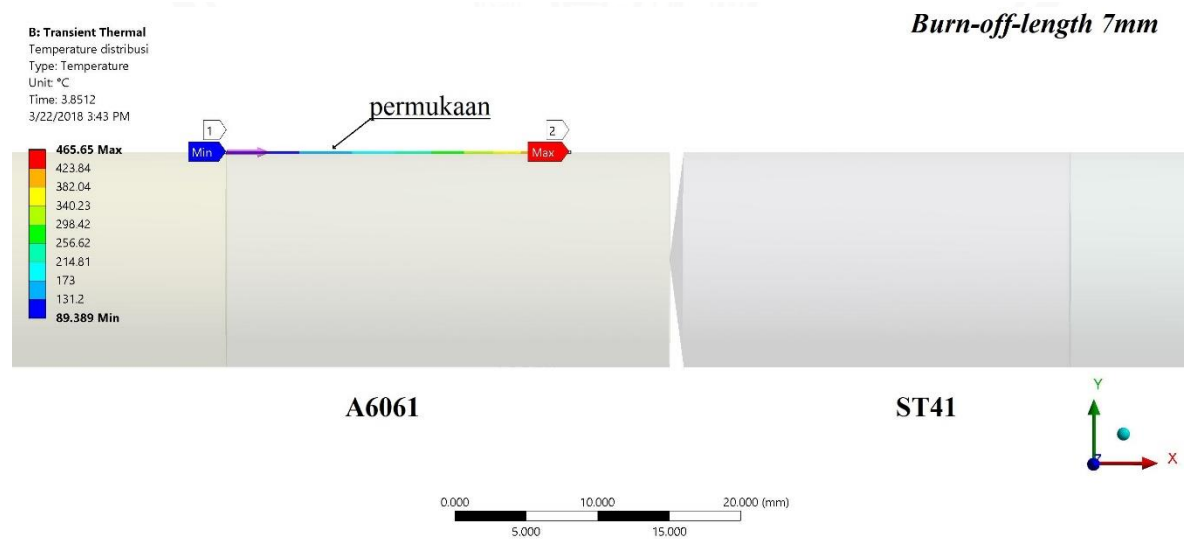
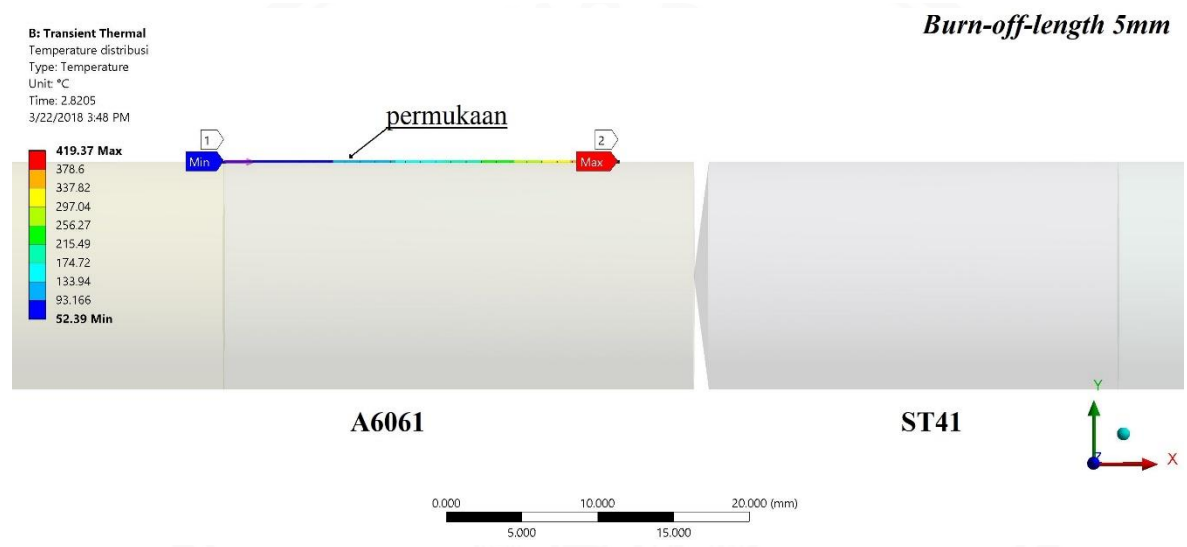
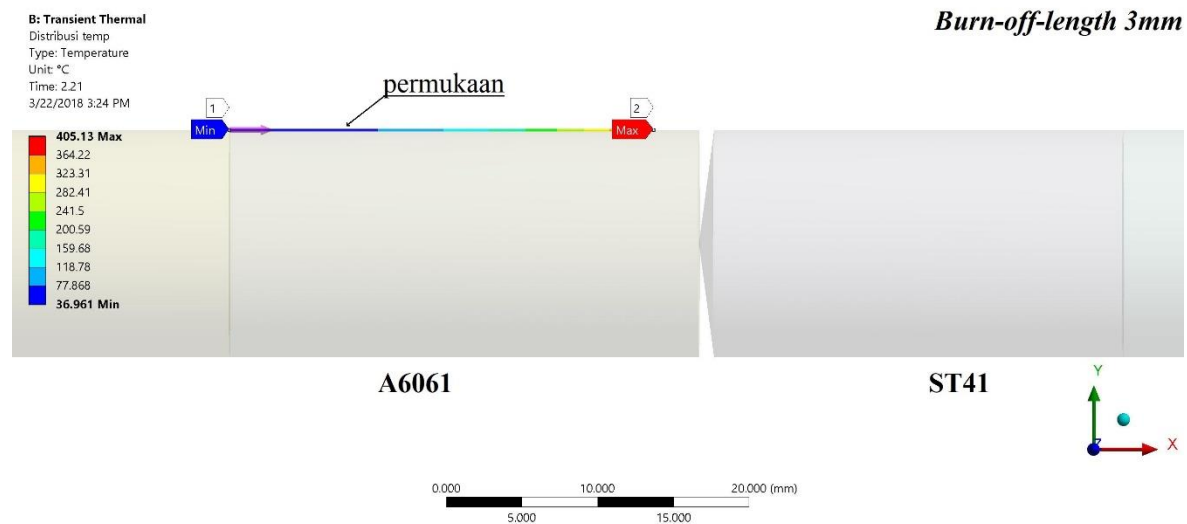


Lampiran 2: Hasil Simulasi (Distribusi Suhu)

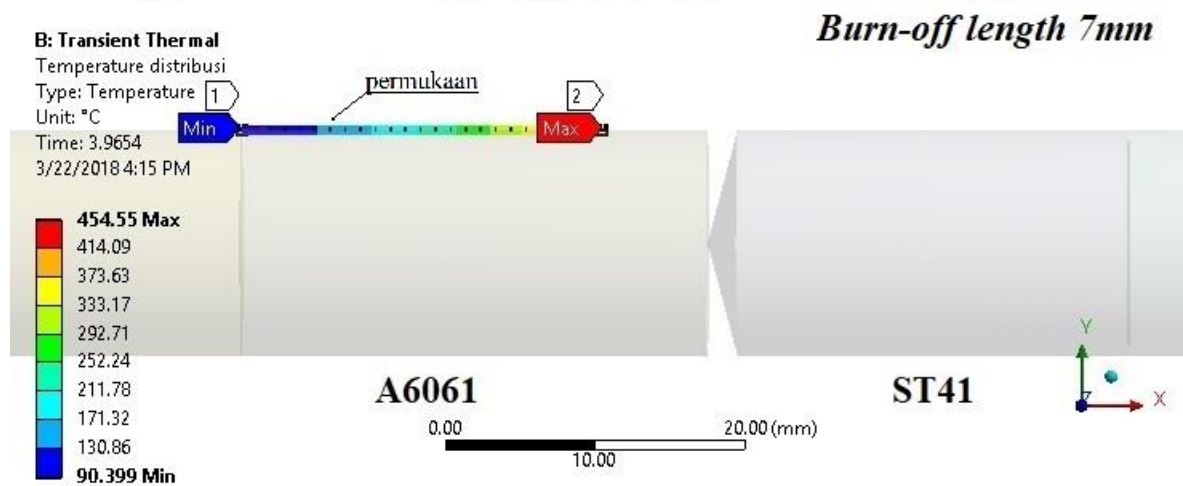
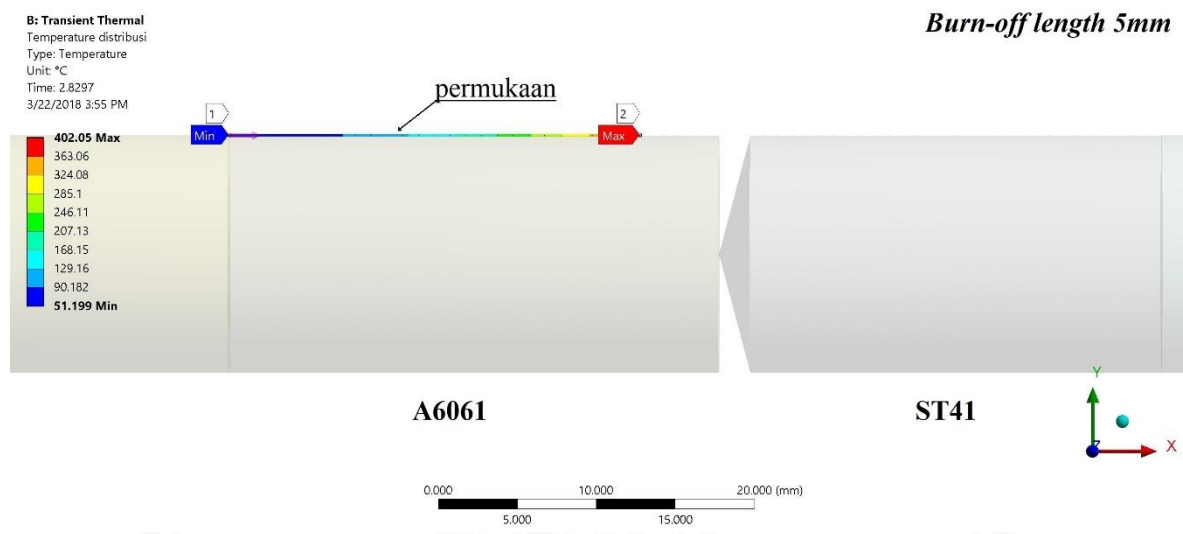
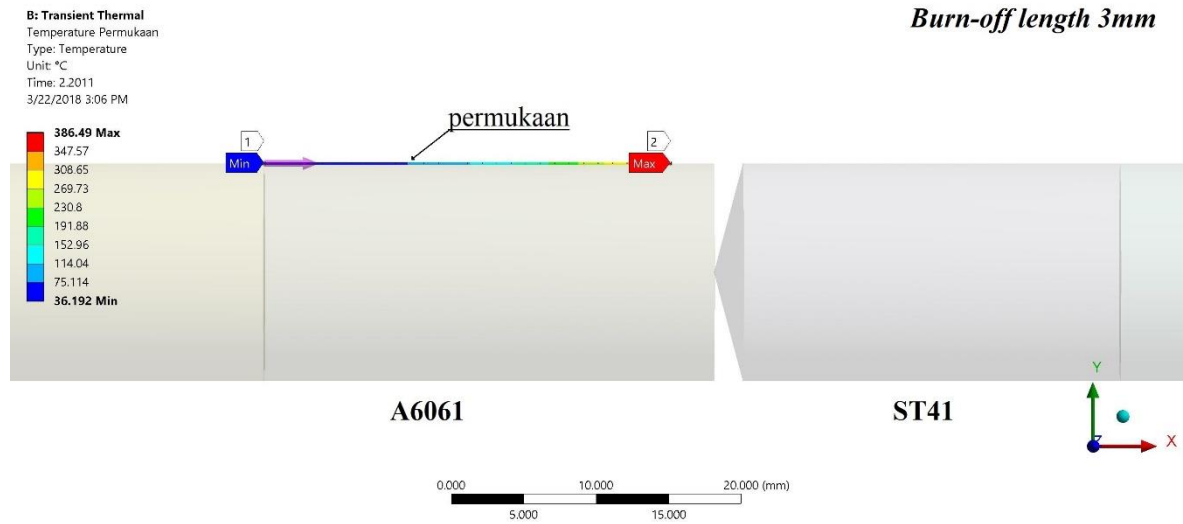
1. Tinggi Kerucut 0 mm



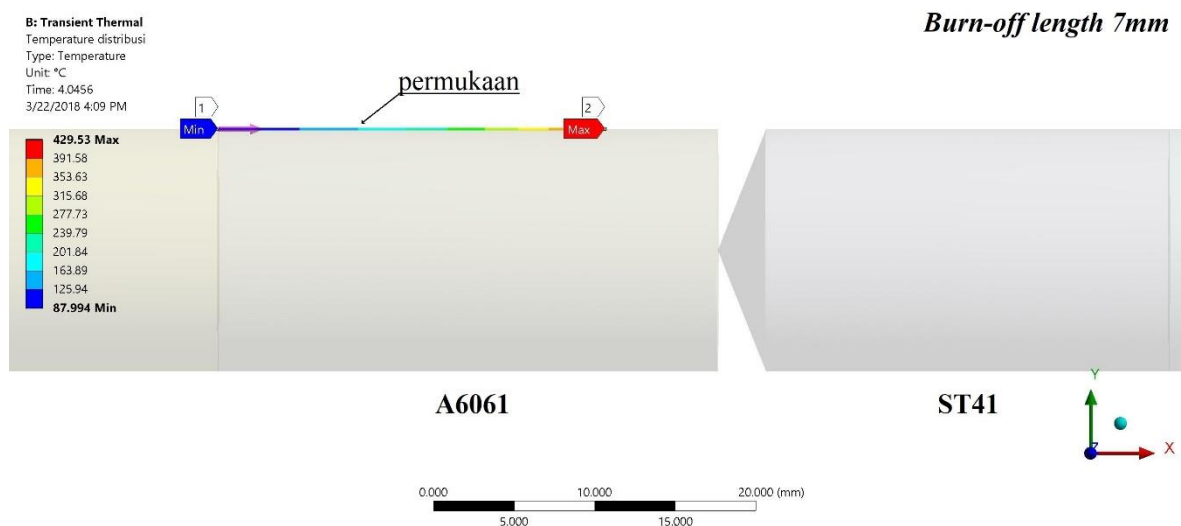
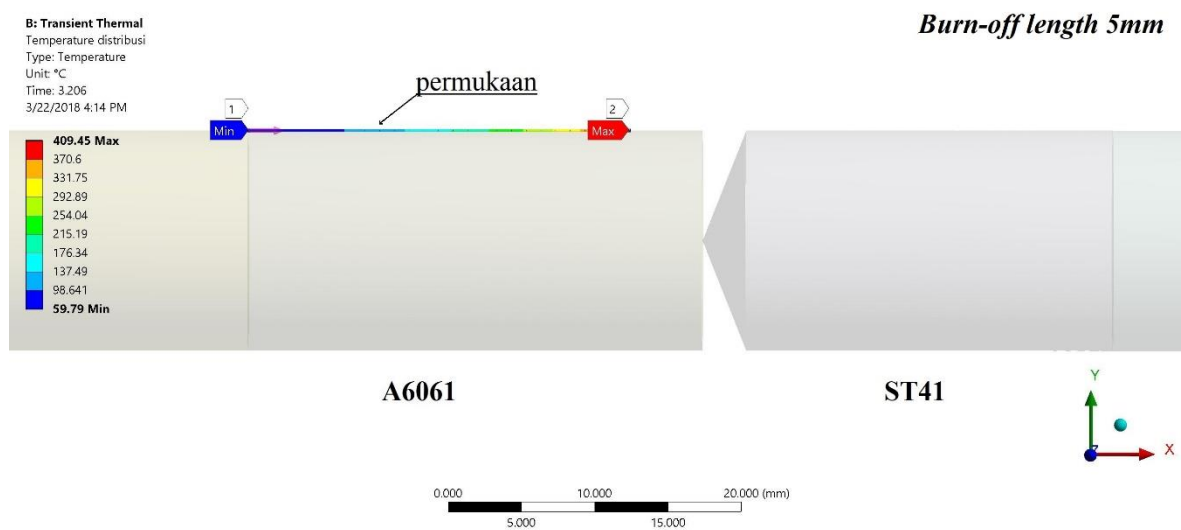
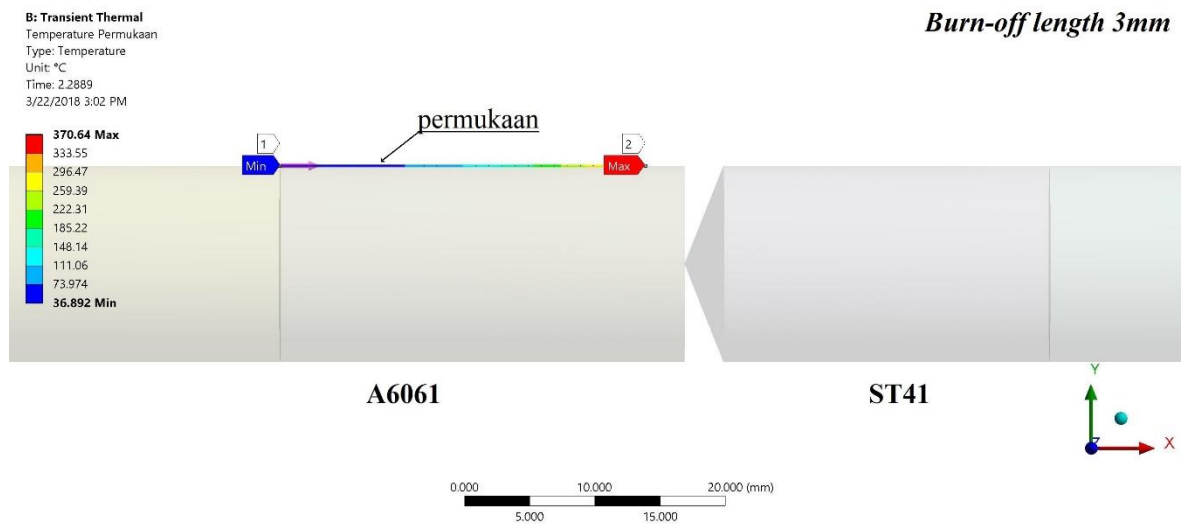
2. Tinggi Kerucut 1 mm



3. Tinggi Kerucut 2 mm

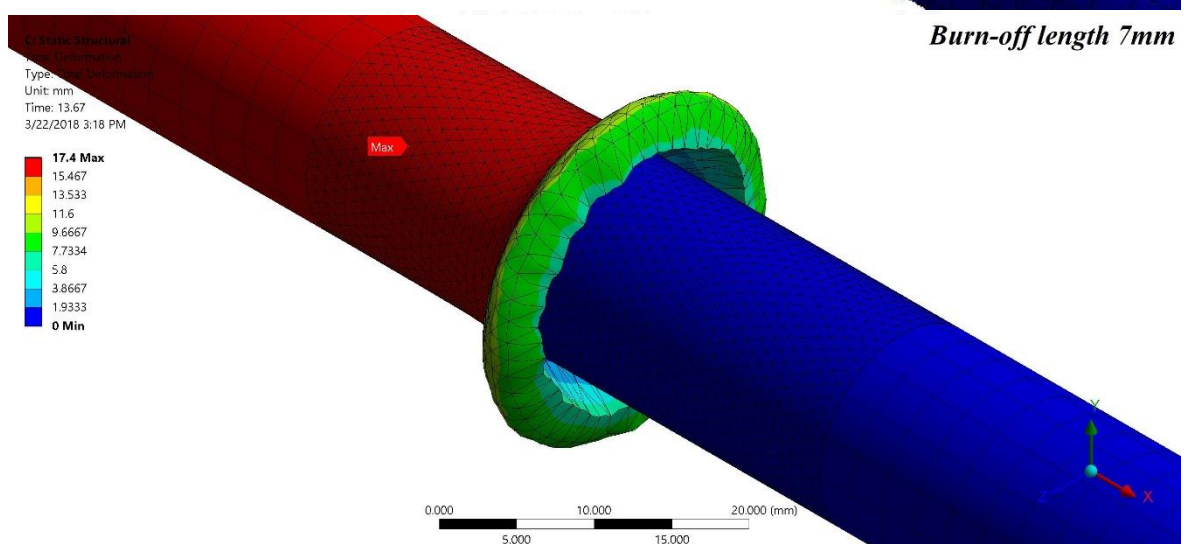
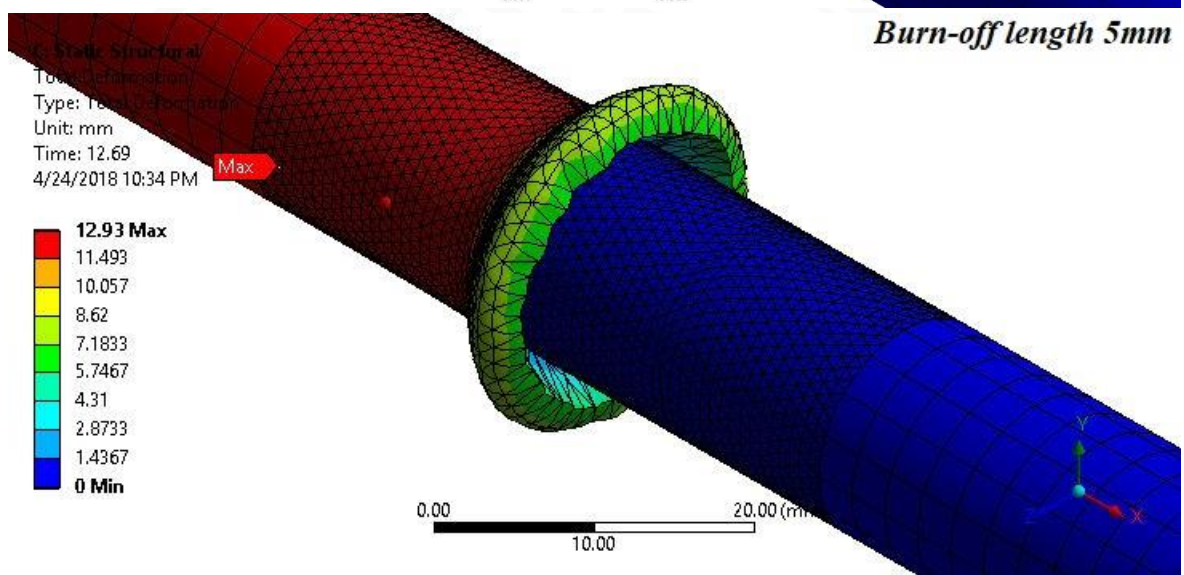
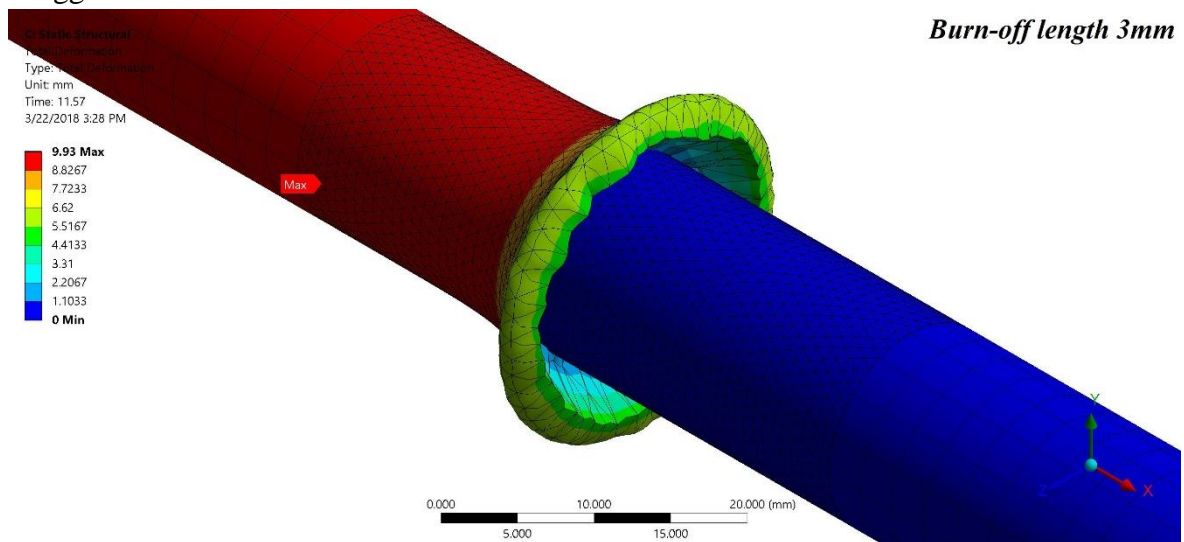


4. Tinggi Kerucut 3 mm

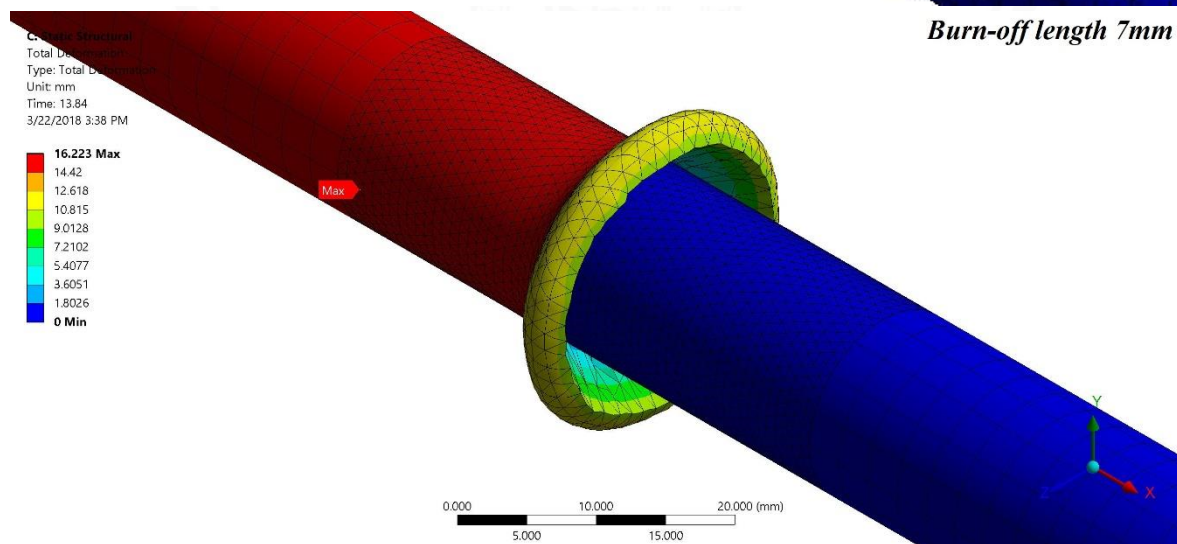
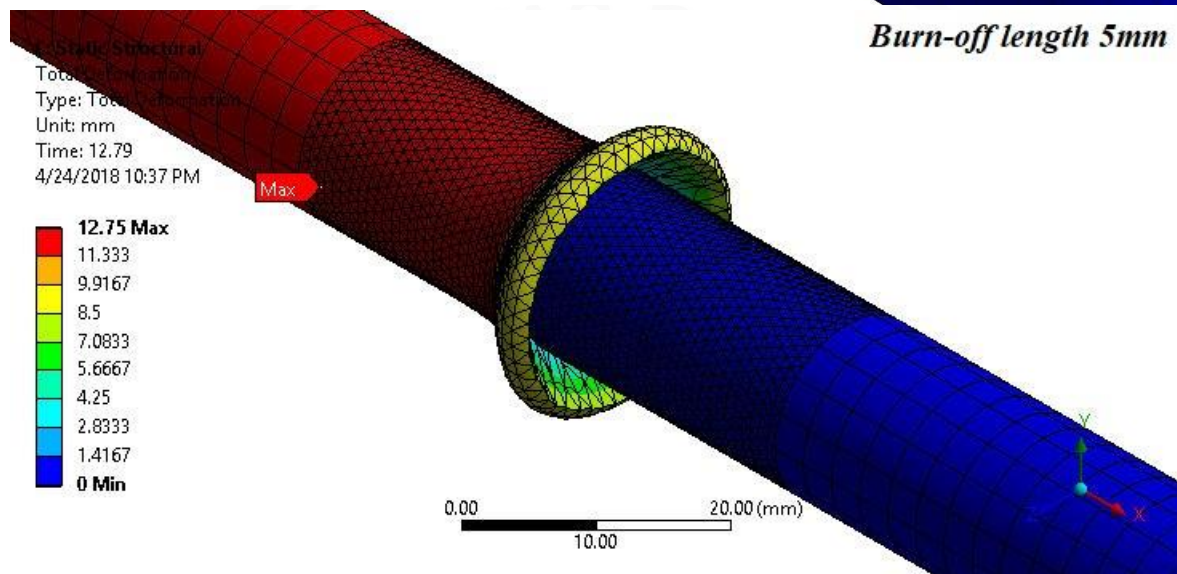
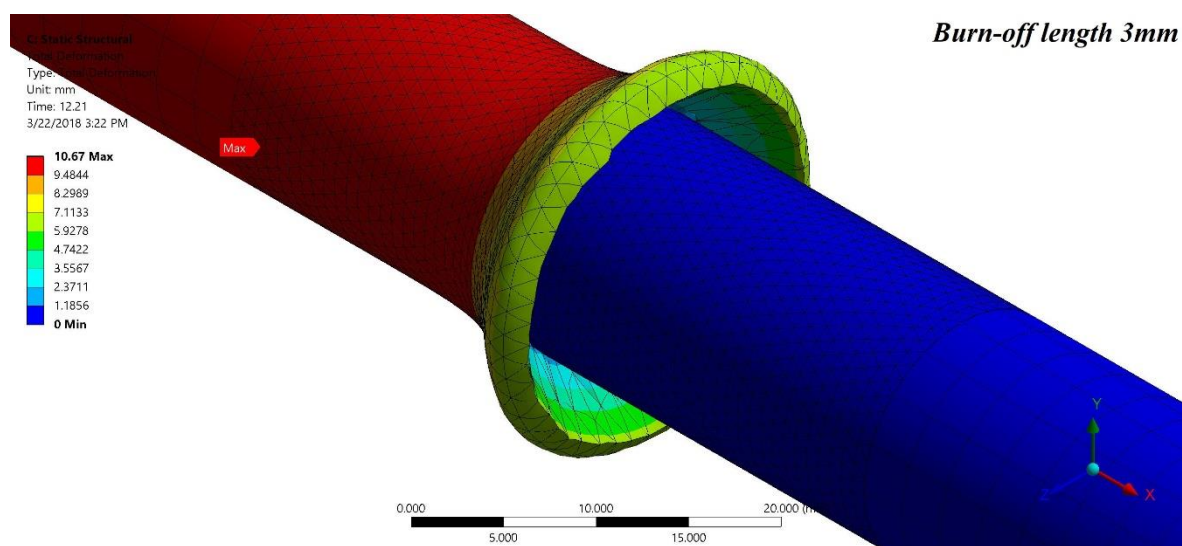


Lampiran 3: Hasil Simulasi (Total deformasi)

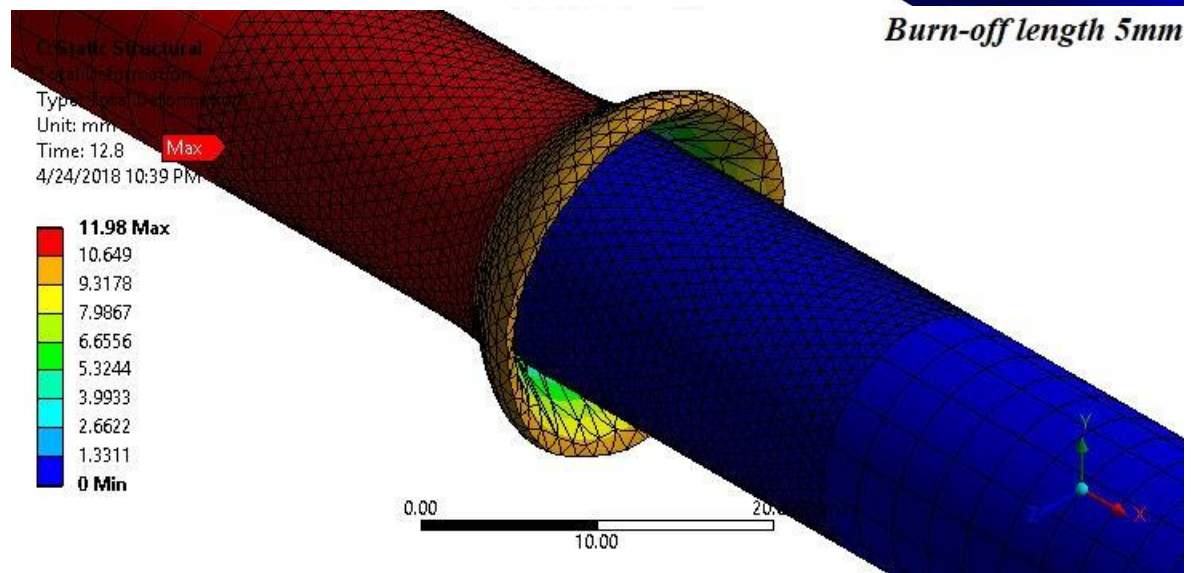
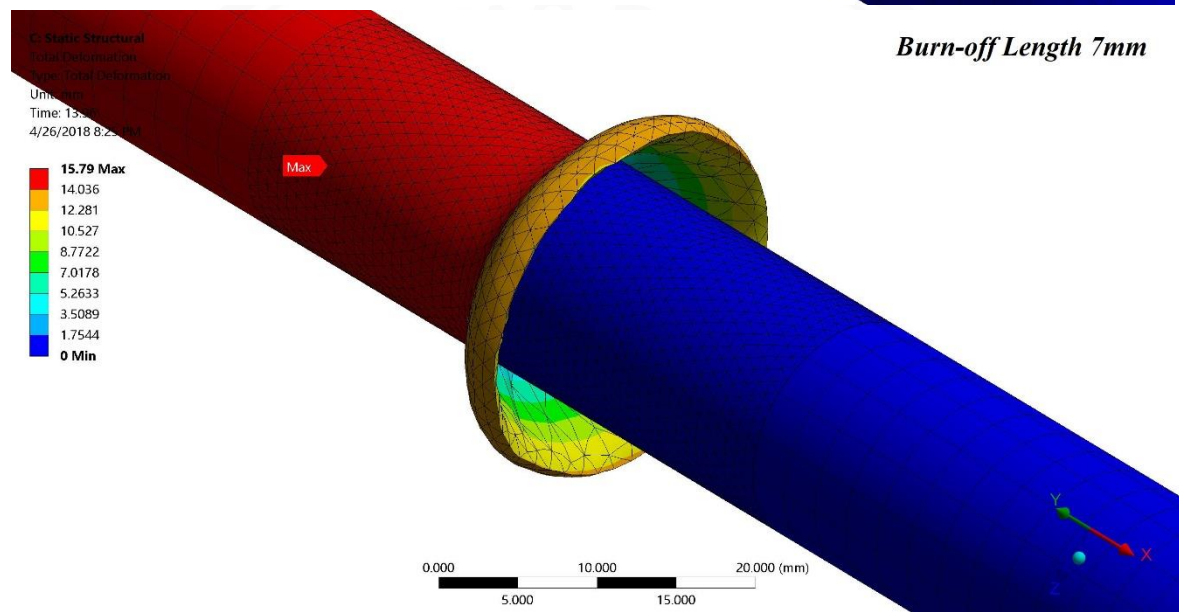
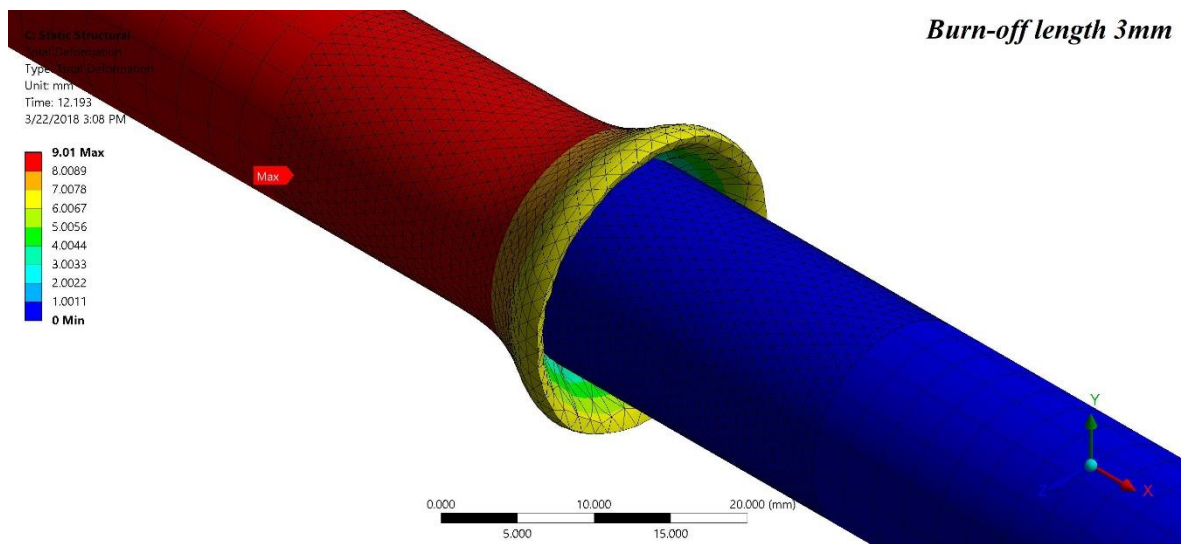
1. Tinggi kerucucut 0mm



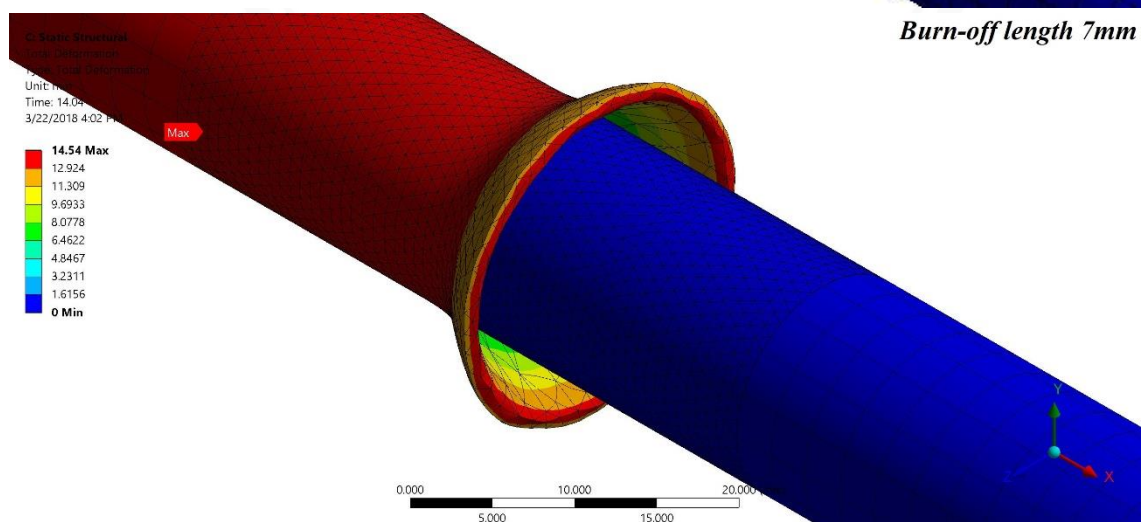
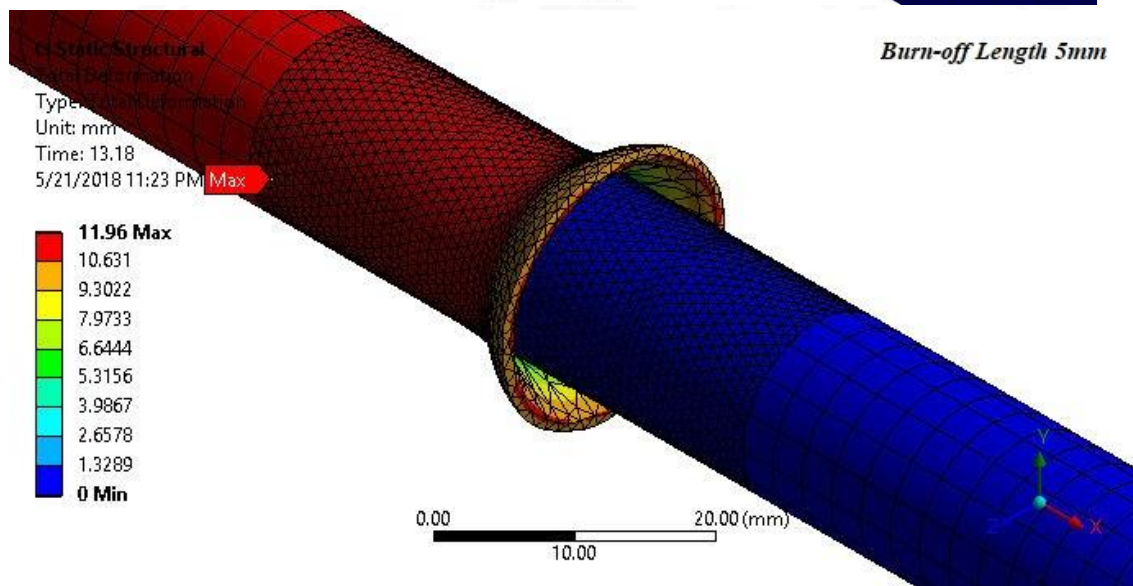
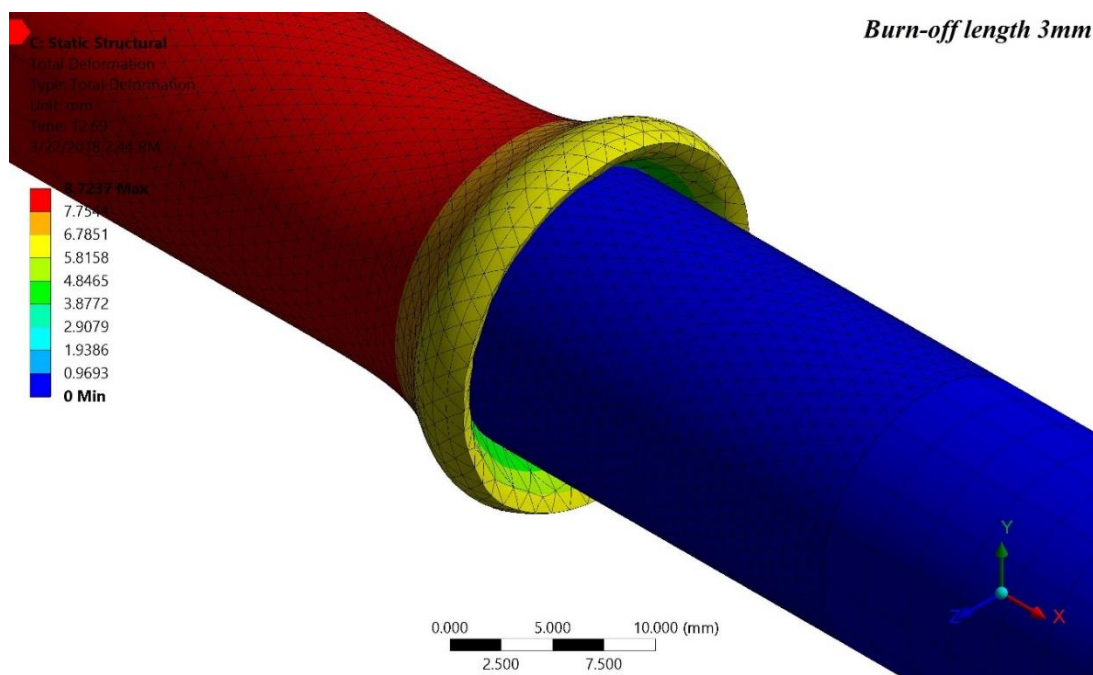
2. Tinggi kerucucut 1mm



3. Tinggi kerucucut 2mm



4. Tinggi kerucucut 3mm



Lampiran 4 : Perhitungan Heat Input Pada masing-masing tinggi kerucut**AL-ST**

$$Q=2/3 \times \pi \times \mu \times p \times \omega \times r^3$$

H0	r(mm)	r (m)	h(mm)	A(mm ²)	A(m ²)	π	μ	p(N)	ω(rad/s)	Q(W)	q(W/mm ²)
	7.5	0.0075	0	176.71	0.000177	3.142857	0.47	39612925.13	167.619	2758.515	7.805203

H1

	r(mm)	r (m)	h(mm)	A(mm ²)	A(m ²)	π	μ	p(N)	ω(rad/s)	Q(W)	q(W/mm ²)
	7.5	0.0075	0	178.28	0.000178	3.142857	0.47	39264078.98	167.619	2734.222	7.668337
	0	0	1	0	0	3.142857	0.47	0	167.619	0	

H2

	r(mm)	r (m)	h(mm)	A(mm ²)	A(m ²)	π	μ	p(N)	ω(rad/s)	Q(W)	q(W/mm ²)
	7.5	0.0075	0	182.89	0.000183	3.142857	0.47	38274372.57	167.619	2665.302	7.286627
	3.75	0.00375	1	45.72	4.57E-05	3.142857	0.47	153105861.8	167.619	1332.724	14.57485
	0	0	2	0	0	3.142857	0.47	0	167.619	0	

H3

	r(mm)	r (m)	h(mm)	A(mm ²)	A(m ²)	π	μ	p(N)	ω(rad/s)	Q(W)	q(W/mm ²)
	7.5	0.0075	0	190.33	0.00019	3.142857	0.47	36778227.29	167.619	2561.116	6.728092
	5	0.005	1	84.59	8.46E-05	3.142857	0.47	82752098.36	167.619	1707.433	10.0924
	2.5	0.0025	2	21.15	2.12E-05	3.142857	0.47	330969267.1	167.619	853.6155	20.18004
	0	0	3	0	0	3.142857	0.47	0	167.619	0	